Pedro Miguel Marques Catarino

Estudos sobre o Comportamento Mecânico e Estrutural das Anteparas nºs 3 e 17 dos Salva-Vidas da Classe Vigilante

Lisboa

2009

UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Faculdade de Ciências e Tecnologia

Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial

Estudos sobre o Comportamento Mecânico e Estrutural das Anteparas nºs 3 e 17 dos Salva-Vidas da Classe Vigilante

Pedro Miguel Marques Catarino

Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Orientador: Professor Doutor Rui Fernando dos Santos Pereira Martins (FCT/UNL, DEMI)

Co-Orientador: Engenheiro Paulo Alexandre Marques Pires da Silva (Direcção de Navios – Marinha Portuguesa)

Lisboa

2009

À minha Mãe,
Maria Ascensão dos Santos Marques

Agradecimentos

Ao longo da realização deste trabalho tive o apoio de diversas pessoas a quem gostava de deixar um profundo agradecimento.

A primeira palavra de agradecimento é dirigida ao meu orientador, o Professor Doutor Rui Fernando Martins, do Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, pelo seu contributo através de uma orientação eficaz e pragmática e, sobretudo, pela sua disponibilidade na resolução de dúvidas e clarificação de ideias.

Ao Co-Orientador Eng. Paulo Pires da Silva, da Direcção de Navios da Marinha Portuguesa, pelo seu contributo através da sua disponibilidade na resolução de todas as dificuldades encontradas no acesso aos navios, tornando-me capaz de realizar a pesquisa a que me propus, bem como concluir o documento apresentado.

A Sua Excelência o Almirante Chefe do Estado-Maior da Armada que possibilitou a realização do estágio curricular e consequente realização do presente documento.

A todos os elementos da Direcção de Navios da Marinha Portuguesa pelo seu simpático acolhimento, nomeadamente ao Eng. Cunha Salvado, ao Eng. Rijo Carola e ao Eng. Leal das Neves.

A todos os elementos da Divisão de Laboratórios e de Qualidade do Arsenal do Alfeite pelo seu contributo, fornecendo condições, equipamentos e ajuda na realização de todos os ensaios experimentais realizados, nomeadamente à Eng.ª. Fátima Inglês, ao Eng. Mário Peixe, ao Sr. Jorge Simões e ao Sr. José Soares.

A toda a minha família, particularmente aos meus pais e ao meu irmão pelo seu total apoio e confiança que depositaram ao longo da realização da presente trabalho, bem como de todo o percurso universitário.

À Inês, agradeço a sua total disponibilidade e amabilidade que demonstrou ao longo de todo o exigente percurso universitário.

Aos meus colegas de curso e de Faculdade, em particular aos meus colegas e amigos João Teixeira, Hugo Rodrigues e Tiago Teixeira, pelo seu companheirismo e apoio constante.

Uma última palavra de agradecimento a todos os que neste trabalho colaboraram dando o melhor do seu saber e da sua experiência.

Resumo

No seguimento de outros trabalhos desenvolvidos em colaboração entre o Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa e a Direcção de Navios da Marinha Portuguesa, o presente documento tem como principal objectivo o estudo do comportamento estrutural das Anteparas nºs 3 e 17 (painéis reforçados em alumínio) das embarcações Salva-Vidas da Classe Vigilante quando submetidas ao efeito de *Slamming* e de alagamento de compartimentos estanques adjacentes.

O estudo inicial do comportamento estrutural das Anteparas foi realizado utilizando o Método dos Elementos Finitos, tendo sido modeladas várias configurações das Anteparas, de modo a obter a contribuição dos vários componentes influentes nas tensões estruturais induzidas pelos carregamentos impostos. Os resultados que advieram permitiram concluir que as tensões máximas induzidas pelo efeito de *Slamming* ocorrem na chapa das Anteparas e, quando simulado o alagamento de compartimentos estanques adjacentes, a tensão máxima induzida ocorre no reforço principal das anteparas, sendo próxima da tensão de cedência do material (230MPa).

Posteriormente, efectuou-se um ensaio extensometrico à Antepara 17 com o objectivo de obter um espectro de carga real de navegação e estimar a vida à fadiga da mesma, tendo em conta o referido espectro. Concluiu-se que, para uma utilização média da embarcação de 400 horas por ano, a Antepara estudada terá vida infinita à fadiga, embora o espectro de carga tenha sido obtido em condições favoráveis à navegação.

Palavras-Chave:

Salva-Vidas da Classe Vigilante; Anteparas; Efeito de *Slamming*; Método de Elementos Finitos; Ensaio Extensometrico; Previsão à Fadiga.

Abstract

Following further work developed in collaboration between the Department of Mechanical and Industrial Engineering of the Faculty of Science and Technology of the New University of Lisbon and the Directorate of Ships of the Portuguese Navy, the main purpose of this thesis is the study of the structural behavior of the bulkheads numbers 3 and 17 of lifeboats Class Vigilante when subjected to the effect of Slamming and flooding of watertight adjacent compartments. The bulkheads consist in reinforced panels in aluminum.

The initial study of the structural behavior of the bulkheads was performed using the Finite Element Method and various configurations of the bulkheads have been modeled in order to obtain the contribution of the various influence components in the induced structural tensions by the imposed loads. The results showed that the maximum stress value induced by the effect of Slamming occurs at the plate of the bulkheads and when simulated the flooding of watertight compartments the maximum stress value is induced in the main reinforce of the bulkheads being close to the yield strength of the material (230MPa).

Subsequently has been made an extensometer test to the bulkhead 17 in order to obtain a real spectrum of loads in navigation condition, to estimate the fatigue life of the bulkhead, taking into account the obtained spectrum. It was concluded that for an average vessel utilization of 400 hours per year, the studied bulkhead will have infinite fatigue life, although the range of load obtained has been on favorable terms for navigation.

Key-Words:

Rescue Vessels of Vigilante Class; Bulkheads; Effect of Slamming; Finite Elements Method; Extensometer Test, Fatigue Prediction.

Simbologia e Acrónimos

Simbologia

- $\rho - massa\ volúmica\ [kg/m^3]$
- $g - aceleração\ gravítica\ [m/s^2]$
- $h - altura\ [m]$
- $P_{h,máx} - pressão\ hidrostática\ máxima\ [Pa]$
- $P_K - pressão\ constante\ [Pa]$
- $\varepsilon - extensão\ [adimensional]$
- $a - comprimento\ [m]$
- $b - largura\ [m]$
- $t - espessura\ [m]$
- $D - rigidez\ à\ flexão\ [N.m]$
- $E - Módulo\ de\ Young\ [Pa]$
- $\upsilon - coeficiente\ de\ Poisson\ [adimensional]$
- $w - deformada\ [m]$
- $\sigma - tensão\ [Pa]$
- $L - comprimento\ [m]$
- $R - resistência\ [\Omega, ohm]$
- $F - factor\ de\ extensómetro\ [adimensional]$
- $P - força, carga\ aplicada\ [N]$
- $M_Z - momento\ flector\ em\ torno\ do\ eixo\ dos\ z's\ [N.m]$
- $I_Z - momento\ de\ inércia\ em\ torno\ do\ eixo\ dos\ z's\ [m^4]$
- $y - distância\ ao\ eixo\ neutro\ [m]$
- $d - deslocamento\ [\mu m]$
- $V - velocidade\ [mm/s]$
- $F - frequência\ [CPM]$
- $\sigma_m - tensão\ média\ [Pa]$
- $\sigma_{máx} - tensão\ máxima\ [Pa]$
- $\sigma_{min} - tensão\ mínima\ [Pa]$
- $R - razão\ de\ tensões\ [Pa]$
- $\sigma_{fo} - tensão\ limite\ de\ fadiga\ [Pa]$
- $\sigma_c - tensão\ de\ cedência\ [Pa]$
- $\sigma_r - tensão\ de\ rotura [Pa]$
- $K - factor\ de\ correcção\ [adimendional]$

Acrónimos

- UAM – Unidade Auxiliar da Marinha
- Al – Alumínio
- Mg – Magnésio
- Si – Silício
- ZAT – Zona Afectada Termicamente
- MEF – Método dos Elementos Finitos
- DLQ – Divisão de Laboratórios e Qualidade
- AA – Arsenal do Alfeite
- HBM - Hottinger Baldwin Messtechnik

Índice Geral

Índice de Figuras

Índice de Quadros

1. Introdução

A presente Tese de Mestrado vem no seguimento de outros trabalhos anteriormente desenvolvidos entre a Marinha Portuguesa, através da Direcção de Navios, e a Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, através do Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial.

Esta cooperação possibilita aos alunos finalistas do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica a realização de estágios curriculares na Direcção de Navios da Marinha Portuguesa, onde podem aplicar e desenvolver os conhecimentos adquiridos durante a formação universitária em ambiente real, tendo em vista a realização de uma Tese de Mestrado e a consequente obtenção do Grau de Mestre.

Os principais objectivos deste trabalho são:

- Caracterizar a resistência à compressão, e a carga combinada de compressão e de pressão lateral, das Anteparas 3 e 17, das embarcações Salva-Vidas da Classe Vigilante.
- Verificar qual a influência das deformações iniciais induzidas pelo fabrico das Anteparas na sua resistência estrutural.
- Fazer a estimativa da vida à fadiga da Antepara 17 para espectros de carga obtidos em serviço/provas de mar.

As embarcações Salva-Vidas da Classe Vigilante, Figura 1.1, são Unidades Auxiliares da Marinha (UAM) e são o primeiro Salva-Vidas integralmente projectado e construído em Portugal.

Figura 1. 1 - Salva-Vidas da Classe Vigilante

Têm 14,5 metros de comprimento total, deslocamento máximo de 18 toneladas e 4,3 metros de boca (largura máxima do navio), como representado na Figura 1.2. A propulsão é feita por dois motores *Scania*, que accionam dois jactos de água, atingindo uma velocidade superior a 25 nós.

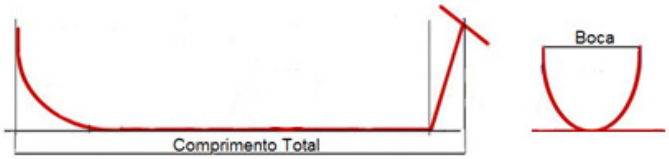


Figura 1. 2 – Características das dimensões principais dos Navios Classe Vigilante (à esquerda vista de lado e à direita vista de frente)

Estes Salva-Vidas, cujo projecto tem por base os mais exigentes requisitos aplicáveis a este tipo de embarcações, estão certificados pela *Rinave/"Bureau Veritas"* com notações próprias de Salva-Vidas Costeiros.

São embarcações auto-endireitantes, isto é, com capacidade de voltar à posição direita, vertical, mesmo que totalmente invertidos, sendo por isso virtualmente inafundáveis. [1][1]

Estas embarcações são capazes de se deslocar a elevadas velocidades e ao mesmo tempo permitem condições de razoável conforto. Permitem também o reboque de outras embarcações e a recuperação de até onze náufragos em mares com grande altura de onda. [1][1]

A sua estrutura, em liga de alumínio, foi dimensionada de forma a possibilitar a operação em mar de força 8 (altura significativa de onda de 9 a 14 m) e ventos de força 10 (48 a 55 nós). [2] [2]

1.1. Anteparas – Conceitos, Geometria

As Anteparas são separações verticais que dividem em compartimentos - paióis, tanques, etc. - o espaço interno do casco de um navio, conferindo estanquicidade e protecção contra incêndio. Contribuem também para manter a forma e aumentar a resistência do casco e de todo o navio.

A Figura 1.3 representa o posicionamento das Anteparas 3 e 17 nas embarcações da Classe Vigilante. A Antepara 17 separa um paiol do compartimento de náufragos interior e a Antepara 3 separa a casa das máquinas da casa dos jactos.

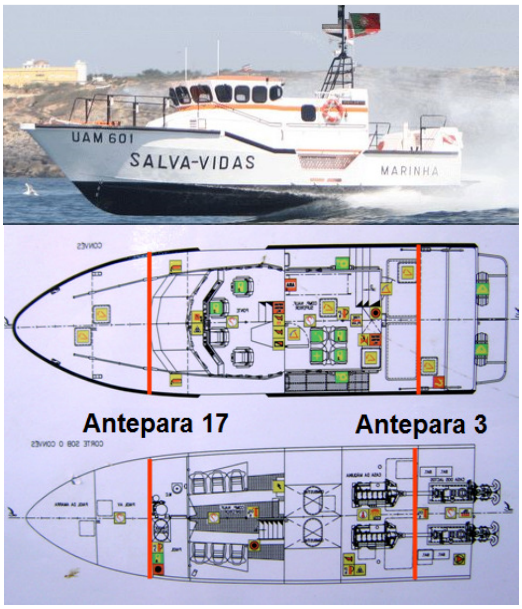


Figura 1. 3 - Posicionamento das Anteparas 3 e 17

[1] *Revista da Armada (Artigo em Colaboração com o Arsenal do Alfeite)*, de Janeiro de 2008
[2] Ministério da Defesa Nacional, *Embarcação Salva-Vidas UAM 602 - "ATENTO"*

As Anteparas 3 e 17 das Embarcações Salva-Vidas da Classe Vigilante são painéis reforçados em ligas de alumínio de Construção Naval, como ilustrado na Figura 1.4.

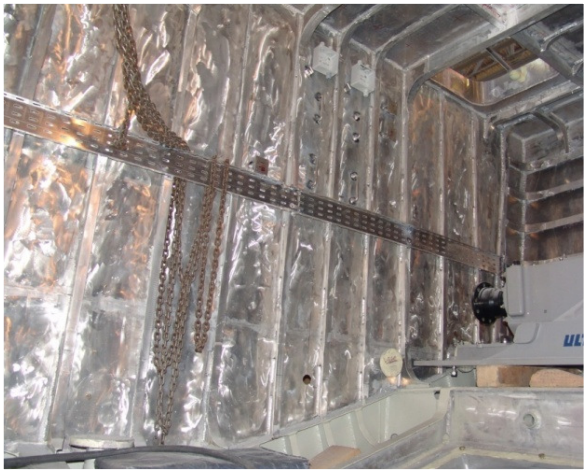


Figura 1. 4 - Antepara 3

As chapas das Anteparas têm 5mm de espessura (Figura 1.4); os reforços têm 3mm de espessura, um formato em *L* e foram soldados perpendicularmente ao plano da Antepara, espaçados de 250mm (Figura 1.5).

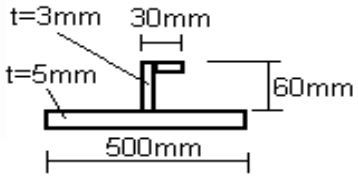


Figura 1. 5 - Geometria das Anteparas e dos Reforços

1.2. As Ligas de Alumínio para Construção Naval e as Propriedades das Ligas Utilizadas na Construção das Anteparas em Estudo

Desde há vários anos que o alumínio tem sido utilizado em estruturas náuticas, sendo o material mais utilizado neste tipo de estruturas a seguir ao aço.

As vantagens das ligas de alumínio, para este tipo de estruturas, são:

- Baixa massa volúmica: três vezes inferior à do aço e ligeiramente superior à da fibra de vidro.
- Boa resistência à corrosão, tanto em água doce como em água salgada.
- Existência em abundância na Natureza.
- É um material dúctil e não magnético.

Em contrapartida, as suas desvantagens são:

- Pouca resistência à fadiga, sendo inferior à do aço.
- Construção relativamente mais dispendiosa quando comparada com a construção em aço (preço do aço inferior ao do alumínio) e em fibra de vidro (possibilidade de construção de moldes).
- Tem uma menor rigidez e menores valores de propriedades mecânicas que o aço.

Quando se selecciona uma liga de alumínio para uma construção soldada, deve ter-se presente que as melhores propriedades da ligação soldada são obtidas com ligas do tipo "tratáveis termicamente", principalmente quando sujeitas a um tratamento de envelhecimento artificial adequado (tempo óptimo de envelhecimento) após soldadura. [3] [3]

Os principais factores que presidem à escolha de uma liga para fins estruturais são então:

- Resistência à cedência/rotura;
- Soldabilidade;
- Facilidade de conformação;
- Resistência à corrosão (factor ainda mais importante em ambientes marítimos).

Mesmo com tratamento térmico após soldadura, a ductilidade de ligações soldadas de ligas de Alumínio tratáveis termicamente é inferior à das ligas endurecidas mecanicamente. As ligas da série 5000 são óptimas neste aspecto. [3][3] Estas ligas possuem soldabilidade excelente, boa resistência à corrosão em ambientes marítimos e boa tenacidade, tanto à temperatura ambiente como a temperaturas criogénicas. [4] [4]

No presente caso de estudo, a liga de alumínio utilizada no fabrico das chapas das Antepara é a liga 5083-H111 (Al-Mg) (uma liga não tratável termicamente), enquanto que os reforços são da liga 6086-T6 (Al-Mg-Si), uma liga tratável termicamente.

As ligas da série 5000 (chapas das Anteparas), não susceptíveis de tratamento térmico, derivam as suas propriedades mecânicas de fenómenos de endurecimento por efeito da solução sólida de determinados elementos de liga e ainda por "encruamento por deformação" durante as operações de laminagem. [3][3]

Em particular, a liga de alumínio 5083 é conhecida pelo seu excepcional desempenho em ambientes onde é necessária uma alta resistência à corrosão em ambientes marítimos e em ambientes químicos desfavoráveis. São também conhecidas as suas boas características mecânicas, quer no estado de material base, quer no estado de "como soldado", não sendo recomendável a sua utilização em aplicações com temperaturas de serviço acima dos 65ºC. [5][5]

---

[3] Branco, C. Moura; Fernandes, A. Augusto; Castro, Paulo, Fadiga de Estruturas Soldadas, 2ª Edição, 1999

[4] Instituto Politécnico de Leiria, Alumínio e Ligas de Alumínio

[5] Dirras, Guy F.; Donnadieu, Patricia; and Douin, Joel, *Dislocation/Precipitate Interaction Mechanisms in 6xxx Aluminium Alloys*

Devido às suas características, as principais aplicações da liga de alumínio 5083 são [3] [6]:

- Construção naval soldada;
- Construção automóvel;
- Construção de tanques de pressão assim como tubagens adjacentes;
- Ferramentas;
- Construção de abrigos anti-minas entre outros.

A liga da série 6000 (6086-T6), na forma de perfil (Figura 1.4), foi utilizada para os reforços das Anteparas. As ligas desta série são tratáveis termicamente e as suas propriedades mecânicas derivam de tratamentos térmicos a altas temperaturas, seguido de um envelhecimento artificial. [4] [7]. No caso específico, a liga foi sujeita a uma solução de tratamento térmico e envelhecido artificial designado de T6 (Ver Anexo 1b).

As ligas de alumínio da série 6000 também são conhecidas por apresentarem excelentes propriedades mecânicas e uma alta resistência à corrosão; é também uma série muito usual no que respeita a perfis, pois são em geral séries mais facilmente extrudíveis. [5] [8]

Apresentam-se em Anexo (Anexo 1.) algumas das principais características de composição e propriedades mecânicas das ligas de alumínio 5083-H111 e 6083-T6.

As ligas da série 5000 (Al-Mg) são normalmente fornecidas sobre a forma de chapas (com espessuras variáveis entre 5 e 25mm), dado que os teores elevados de Mg destas ligas dificultam a operação de extrusão a quente. Assim, em geral, usam-se ligas da série 6000 (Al-Mg-Si), mais facilmente extrudíveis e, por esse motivo, sob a forma de perfis, conjuntamente com as ligas da série 5000 (Al-Mg), sob a forma de chapas. [3][6]

Quando se soldam estas ligas, como no caso em estudo, os reforços soldados à chapa da Antepara através de soldaduras de canto (Figura 1.6) sofrem "tratamento térmico", produzindo-se um recozido parcial na zona da ligação soldada da liga da série 6000, na zona afectada termicamente (ZAT), dependendo a largura da zona afectada da energia térmica do processo de soldadura. Assim, para efeitos de cálculo/projecto, as tensões admissíveis estáticas são definidas com base nas propriedades do material no estado de recozido da liga da série 6000.

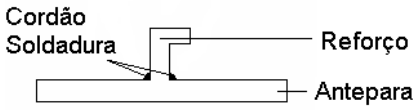


Figura 1. 6 - Ilustração de Soldadura de Canto entre Chapa da Antepara e Reforço

[6] Branco, C. Moura; Fernandes, A. Augusto; Castro, Paulo, Fadiga de Estruturas Soldadas, 2ª Edição, 1999

[7] Instituto Politécnico de Leiria, *Alumínio e Ligas de Alumínio*

[8] Dirras, Guy F.; Donnadieu, Patricia; and Douin, Joel, *Dislocation/Precipitate Interaction Mechanisms in 6xxx Aluminium Alloys*

Em trabalhos anteriores [6][9], foram realizados ensaios de tracção às ligas de alumínio constituintes das Anteparas. Os gráficos das curvas tensão-extensão, obtidas em [6][9] das ligas 5083-H11 (chapa das Anteparas) e 6082-T6 (reforços das Anteparas) extensão encontram-se no Anexo 2.

A largura total da ZAT está dependente do processo de soldadura utilizado, do estado do material base e da geometria da peça a soldar, tal como é descrito no Apêndice A da referência bibliográfica [3][10].

Foi efectuado anteriormente um estudo ao comportamento mecânico e estrutural dos materiais constituintes das Anteparas 3 e 17, das embarcações da Classe Vigilante [7][11], onde se considerou a influência da ZAT no comportamento dos painéis reforçados. Para efeito da análise dos resultados obtidos no presente estudo, adoptam-se as conclusões obtidas em [7][11] que não revelarem diferenças relevantes no comportamento estrutural dos painéis reforçados quando considerada a ZAT.

[9] Matias, Carlos, *Estudo do comportamento de ligas de alumínio para construção naval*, Janeiro de 2008

[10] Branco, C. Moura; Fernandes, A. Augusto; Castro, Paulo, Fadiga de Estruturas Soldadas, 2ª Edição, 1999

[11] Matos J. A. Boto, *Estudo do Comportamento mecânico/estrutural de painéis reforçados em ligas de alumínio de construção naval*, Julho de 2008

2. Carregamentos nas Anteparas

As Anteparas em estudo foram projectadas para suportar solicitações de compressão, devido ao efeito de *Slamming* (carregamento no plano), e solicitações de pressão lateral hidrostática, devido ao hipotético alagamento dos compartimentos estanques adjacentes, tal como está ilustrado na Figura 2.1.

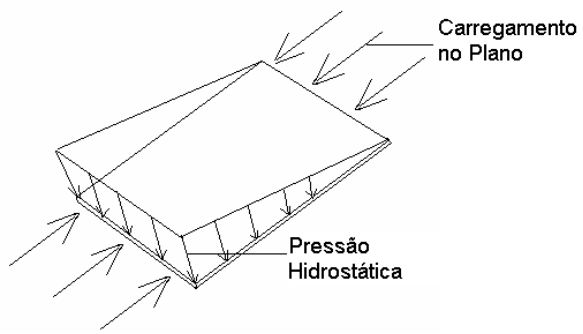


Figura 2. 1 - Carregamentos nas Anteparas

Nos próximos subcapítulos é feita a caracterização dos fenómenos que dão origem aos carregamentos a que as Anteparas estão sujeitas.

2.1. *Slamming* - Carregamento no Plano [8] [12]

Tem vindo a ser estudado e demonstrado, que a excitação e a vibração, causadas pelo impacto dos navios nas ondas, têm efeitos associados à fadiga das estruturas navais, sobretudo em navios com bocas largas, embora também em embarcações de menor dimensão.

Conhecimentos empíricos mostram que existem dois principais fenómenos dinâmicos que afectam a estrutura do navio. [8][12] São eles:

- *Whipping* - que é o resultado vibratório da estrutura no primeiro modo de vibração natural causado pelo impacto hidrodinâmico da proa aquando da reentrada na água (*Slamming*) como ilustrado na Figura 2.2, ou ainda devido ao violento impacto de ondas de grande altura no casco (*Slapping*);

[12] *The Naval Architect*, Setembro 2008, Feature 7

Figura 2. 2 - Efeito de *Slamming*

O efeito de *Slamming* induz forças elevadas, de curta duração (alta frequência), semelhantes a impulsos e pode ser potencialmente perigoso quando a frequência natural da estrutura do navio e a frequência de impacto nas ondas coincidam, causando amplificação dos efeitos dinâmicos.

Este fenómeno ocorre principalmente para situações de mar onde a altura significativa das ondas é maior, e está directamente relacionado com a orientação do navio em relação à onda e ainda à velocidade relativa entre a onda e o navio. [8][13]

Os principais efeitos deste fenómeno são, a possibilidade de ser excedido o momento flector vertical, causando deformações permanentes ao longo da direcção longitudinal da estrutura do navio e ainda a prematura falha por fadiga nas estruturas mais frágeis.

Estudos preliminares demonstram que a frequência natural da estrutura das embarcações da Classe Vigilante está afastada das frequências de carregamento impostas pelo efeito de *Slamming*. [9][14]

2.1.1. Valor de Carregamento nas Anteparas devido ao Efeito de *Slamming*

O valor de carregamento, devido ao efeito de *Slamming,* utilizado no estudo do comportamento estrutural das Anteparas 3 e 17 (Cap. 4), das embarcações da Classe Vigilante, teve por base um estudo [9][14] onde se considerou um navio com deslocamento de 90 toneladas, 22 nós de velocidade máxima e altura significativa de onda igual a 10m, tendo sido calculada uma pressão máxima de impacto igual a 150kPa.

As embarcações da Classe Vigilante têm um deslocamento de 18 toneladas, uma velocidade superior a 25 nós, e foram dimensionadas de forma a possibilitar a operação em mar de força 8 (altura significativa de onda até 14m), pelo que se decidiu adoptar o mesmo valor de 150kPa

[13] *The Naval Architect*, Setembro 2008, Feature 7

[14] Silva, Paulo P. ; Pereira, Carlos A. ; Mateus, António F., *Performance Enhacement of Structural Details in Aluminium Crafts*, 2004

de tensão máxima de impacto, valor que está em acordo com o cálculo apresentado em [10][15], que foi de 178kPa, e que foi obtido de acordo com [11][16].

2.2. Hipotético Alagamento dos Compartimentos Estanques Adjacentes – Pressão Lateral

As regras de projecto obrigam a que as Anteparas resistam a uma hipotética situação de alagamento total de um dos compartimentos estanques adjacentes. Este facto provoca pressão hidrostática crescente e transversal ao plano da Antepara como ilustrado na Figura 2.3.

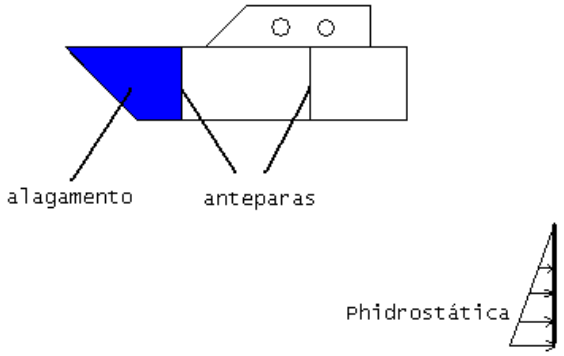


Figura 2. 3 - Alagamento de um Compartimento Estanque, Pressão Hidrostática

2.2.2 Valor de Carregamento nas Anteparas devido ao Hipotético Alagamento de Compartimentos Estanques.

A pressão hidrostática a que Anteparas poderão estar sujeitas resulta do hipotético alagamento total de um dos compartimentos estanques adjacentes, sendo que:

$$P_{h,máx} = \rho g h \; [Pa] \qquad [2.1]$$

onde ρ é a massa volúmica da água salgada a 25ºC ($1025\ kg/m^3$), g corresponde à aceleração da gravidade e h à altura da Antepara. Assim, a pressão hidrostática aplicada a cada antepara vem igual a :

- Antepara 3: $P_{h,máx} = 1025 \times 9.81 \times 2.125m = 21367\ Pa$;
- Antepara 17: $P_{h,máx} = 1025 \times 9.81 \times 2.750m = 27652\ Pa$.

[15] João Matos, Paulo Silva, R.F.Martins, A.R.Mateus, "Influence of production defects in the structural resistance of reinforced panels in aluminium crafts", July 2009

[16] Lloyd's Register of Shipping Rules and regulations for the Classification of Special Service Craft, Lloyd's Register of Shipping, Cap.3, 1999, London

Utilizando um valor de pressão constante, em vez da pressão hidrostática calculada, de acordo com o referido em [11][17], para compartimentos sob alagamento total, a pressão de projecto é:

$$P_K = 7.2 \times h\ (kN/m^2) \quad [2.2]$$

Sendo *h* a altura da Antepara. Logo, fica:

- Antepara 3: $P_K = 7.2\ \times 2.215m = 15300\ (N/m^2)$;
- Antepara 17: $P_K = 7.2\ \times 2.750m = 19800\ (N/m^2)$.

[17] *Rules and Regulations for Classification of Special ServiceCraft*, Lloyd's Register of Shipping, 1999, London

3. Teoria de Placas (Cálculo Analítico)

O estudo do comportamento mecânico e estrutural das Anteparas pode-se aproximar ao estudo de placas reforçadas, uma vez que são elementos estruturais planos, em que a espessura tem uma dimensão muito inferior quando comparada com as outras dimensões.

Deste modo, optou por se iniciar o presente estudo analisando o comportamento de placas sujeitas a diferentes condições de carregamento e de condições de fronteira, validando resultados obtidos por via numérica por comparação com resultados obtidos através de expressões analíticas. O cálculo das deformadas e tensões obtidas por via numérica foi feito através do Método de Elementos Finitos (MEF).

Por se considerar útil, segue-se uma breve descrição da teoria do Método de Elementos Finitos.

3.1. Método de Elementos Finitos (MEF) [12][18]

O Método dos Elementos Finitos (MEF) utiliza aproximações numéricas que permitem a resolução de problemas de estruturas e carregamentos complexos que seriam de difícil, ou até de impossível análise pelas Teorias Analíticas clássicas.

Este Método consiste na subdivisão de um determinado domínio contínuo em pequenos elementos discretos, interligados por pontos nodais.

No âmbito da Engenharia, o MEF pode ter como objectivo principal a determinação do estado de tensão e de deformação de um sólido de geometria arbitrária sujeito a acções exteriores.

É uma técnica numérica para encontrar soluções aproximadas de equações diferenciais parciais, bem como das equações integrantes. A solução é baseada tanto na abordagem de, eliminar completamente a equação diferencial (problemas no estado estável), ou tornar as equações diferenciais parciais numa aproximação a um sistema de equações diferenciais ordinárias, que são integradas numericamente utilizando técnicas analíticas convencionais, como o Método de Euler ou de Runge-Kutta. [12][18]

O modelo matemático consiste na combinação de equações de cada elemento finito, de forma a gerar uma solução para o domínio que satisfaça as condições de fronteira. As aproximações associadas aos elementos finitos dependem de várias variáveis, como por exemplo: o tipo de elementos escolhidos, o número de elementos utilizados para a modelação do domínio e as condições de fronteira existentes.

[18] Azevedo, Álvaro F. M., *Método dos Elementos Finitos*, Abril de 2003

Existem três tipos de elementos principais, são eles:

a) Elemento unidimensional e na direcção x, com dois pontos nodais i e j, como ilustrado na Figura 3.1:

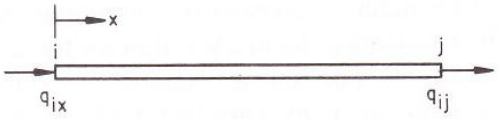


Figura 3. 1 - Elemento Unidimensional na Direcção x (elemento barra)

b) Elemento bidimensional no plano x,y e com três pontos nodais, i, j, k, como ilustrado na Figura 3.2:

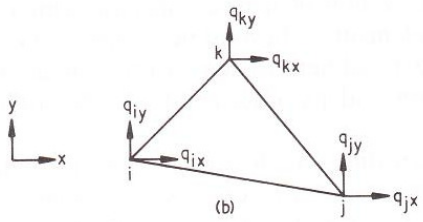


Figura 3. 2 - Elemento Bidimensional da Direcção xy (elemento placa/casca)

c) Elemento tridimensional rectangular com três pontos nodais, como ilustrado na Figura 3.3:

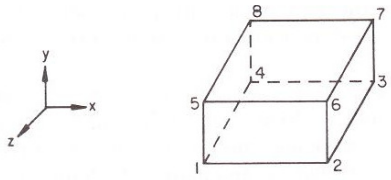


Figura 3. 3 - Elemento Tridimensional (elemento sólido)

Considerando que a matriz [δ] representa a matriz de deslocamentos de um elemento, sendo que o tamanho da matriz deslocamento depende da complexidade do elemento a ser considerado, a matriz [q] define o deslocamento dos pontos nodais de um elemento e a matriz [F] define as forças aplicadas nos pontos nodais. A matriz [q] e [F] dependem também do tipo e da geometria do elemento a ser considerado.

Como exemplo, e para elementos com deslocamentos uniaxiais e biaxiais temos:

$$[q] = \begin{bmatrix} q_{ix} \\ q_{jx} \end{bmatrix} \qquad [F] = \begin{bmatrix} F_{ix} \\ F_{jx} \end{bmatrix}$$

$$[q] = \begin{bmatrix} q_{ix} \\ q_{iy} \\ q_{jx} \\ q_{jy} \\ q_{kx} \\ q_{ky} \end{bmatrix} \quad [F] = \begin{bmatrix} F_{ix} \\ F_{iy} \\ F_{jx} \\ F_{jy} \\ F_{kx} \\ F_{ky} \end{bmatrix}.$$

A Matriz de função forma [N] define a relação entre a função dos pontos nodais e a função do elemento, ou seja a relação entre a deformação dos pontos nodais [q] e a deformação geral δ, e pode assim ser expressa:

$$\begin{aligned} \delta &= [N_i \quad N_j] \begin{bmatrix} q_i \\ q_j \end{bmatrix} \\ &= [N][q] \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_i & 0 & N_j & 0 & N_k & 0 \\ 0 & N_i & 0 & N_j & 0 & N_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_{ix} \\ q_{iy} \\ q_{jx} \\ q_{jy} \\ q_{kx} \\ q_{ky} \end{bmatrix}$$

Ou simplificadamente, [δ] =[N] [q]

A deflexão num elemento pode ser expressa em termos de deflexão dos pontos nodais:

$$[\varepsilon] = [d][N][q].$$

A tensão pode ser obtida por:

$$\begin{aligned} [\sigma] &= [D][\varepsilon] - [D][\varepsilon_o] \\ &= [D][B][q] - [D][\varepsilon_o] \end{aligned}$$

Onde $[\varepsilon_0]$ é a deformação inicial e [ε] é a deformação total.

Com estas definições, as equações básicas dos elementos finitos podem ser obtidas. Mais informação sobre o MEF, nomeadamente no que respeita às propriedades dos elementos finitos, às matrizes a utilizar e qual a formulação matemática, pode ser encontrada na referência bibliográfica [12][19].

[19] Azevedo, Álvaro F. M., *Método dos Elementos Finitos*, Abril de 2003

3.2. Solução de Navier vs. Solução Numérica de Placas

Tendo em vista o objectivo final, realizaram-se vários estudos a placas rectangulares simples utilizando a solução de Navier através das Séries de Fourier. Foi feita a comparação dos resultados obtidos por via analítica com os resultados obtidos através do MEF, tendo sido utilizado o programa SolidWorks/CosmosWorks® com elementos de tipo bidimensional xy (Figura 3.2).

No Capítulo 9 da referência bibliográfica [13][20], que serviu de referência para o estudo comparativo e de validação realizado e apresentado nos próximos sub-capítulos, o Método de Navier foi aplicado para diferentes condições fronteira e diferentes carregamentos aplicados em placas rectangulares apoiadas nas quatro arestas.

Os resultados analíticos das deformadas foram calculados utilizando os seis primeiros termos das Séries de Fourier, tendo este número de termos mostrado ser suficiente, em função da rápida convergência das soluções obtida com baixo número de termos.

3.2.1. Placa rectangular, simplesmente apoiada em todas as arestas, sujeita a carregamento lateral constante q_0 (Figura 3.4)

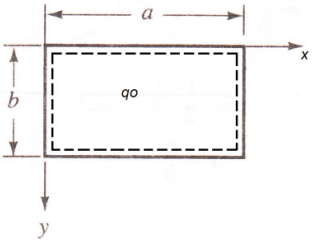


Figura 3. 4 - Placa Rectangular Simplesmente Apoiada Sujeita a Carregamento Lateral

Demonstra-se no capítulo 9 da refreência bibliográfica [13][20] que a solução de Navier para a deformada da placa e carregamentos representados na Figura 3.4 vem na seguinte forma:

$$w = \frac{16q_0}{\pi^6 D}\sum_m^{\infty}\sum_n^{\infty}\frac{\sin\frac{m\pi x}{a}\sin\frac{n\pi y}{b}}{mn\left(\frac{m^2}{a^2}+\frac{n^2}{b^2}\right)} \quad [3.1]$$

Onde D representa o Módulo de Rigidez da placa à flexão e é dada por:

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\upsilon^2)} \quad [3.2]$$

[20] Maan H. Jawad, *Theory and design of plates and shell structures*

Onde *E* representa o Módulo de Young do material constituinte da placa, *t* a espessura da placa e υ o coeficiente de Poisson.

Considerando uma placa quadrada (axb=1x1m), com 5mm de espessura (t), de uma liga de alumínio 5083, sujeita a um carregamento $q_0 = 1000Pa$, tem-se:

$$Dados \begin{cases} E = 71E9Pa \\ \upsilon = 0.33 \\ q_0 = 1000Pa \\ t = 5mm = 5E-3m \\ a = b = 1m \end{cases}$$

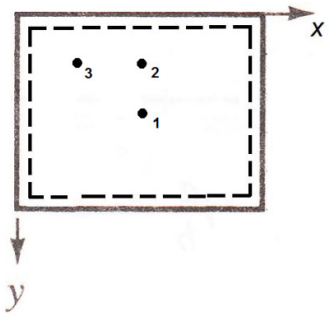
que o Módulo de Rigidez à flexão (D) da placa é igual a:

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\upsilon^2)} = \frac{71E9 \times (5E-3)^3}{12(1-0.33^2)} \simeq 829.966$$

A solução de Navier vem então na forma de:

$$w = \frac{16q_0}{\pi^6 D} \sum_m^{\infty} \sum_n^{\infty} \frac{\sin\frac{m\pi x}{a} \sin\frac{n\pi y}{b}}{mn\left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}\right)} \Leftrightarrow w = \frac{16 \times 1000}{\pi^6 \times 829.966} \sum_m^{\infty} \sum_n^{\infty} \frac{\sin\frac{m\pi x}{1} \sin\frac{n\pi y}{1}}{mn\left(\frac{m^2}{1^2} + \frac{n^2}{1^2}\right)}$$

Foram escolhidos três pontos representativos, Figura 3.5., para o cálculo da deformada através da solução de Navier e posterior comparação com a solução numérica.



- Ponto 1 (Ponto de deformada máxima a meio vão), coordenadas (0.5;0.5)
- Ponto 2, coordenadas (0.5;0.25)
- Ponto 3, coordenadas (0.25;0.25)

Figura 3. 5 - Pontos Representativos

Os valores das deformadas obtidas pela solução de Navier foi igual a:

$$Ponto1: w_1 = 4.950E-3m$$
$$Ponto2: w_2 = 3.587E-3m$$
$$Ponto3: w_3 = 2.536E-3m$$

A placa em estudo foi então modelada em SolidWorks e sujeita às condições fronteira e carregamentos referidos (Figura 3.6).

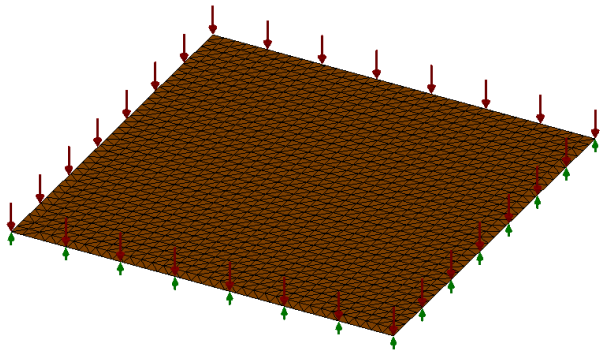


Figura 3. 6 - Modelação da Placa Sujeita a Carregamento Lateral

Retiraram-se os valores de deformada dos pontos 1, 2 e 3 e as conclusões encontram-se na tabela 3.1.

Tabela 3. 1 - Valores de Deformada Analítica vs. Cosmos (Carregamento Lateral)

	Deformada Analítica	Deformada em CosmosWorks	Diferença
Ponto 1	$w_1 = 4.950E-3m$	$w_1 = 4.897E-3m$	1.1%
Ponto 2	$w_2 = 3.587E-3m$	$w_2 = 3.589E-3m$	0.05%
Ponto 3	$w_3 = 2.536E-3m$	$w_3 = 2.537E-3m$	0.04%

3.2.2. Placa rectangular simplesmente apoiada em todas as arestas sujeita a carregamento combinado de pressão lateral uniforme q_0 e tensão no plano *N*.

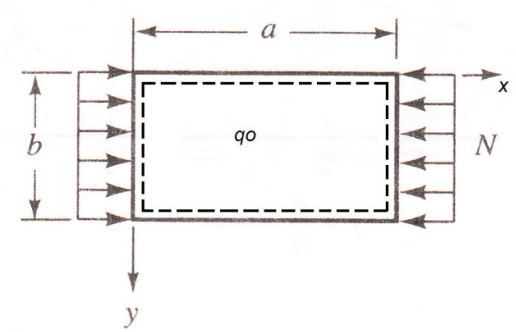


Figura 3. 7 - Placa Rectangular Simplesmente Apoiada Sujeita a Carregamento Combinado

Demonstra-se no capítulo 9 da refreência bibliográfica [13][21] que a solução de Navier para a deformada da placa e carregamentos representados na Figura 3.10 vem na seguinte forma:

$$w = \frac{16q_0}{\pi^6 D}\sum_m^{\infty}\sum_n^{\infty}\frac{\sin\frac{m\pi x}{a}\sin\frac{n\pi y}{b}}{mn\left[\left(\frac{m^2}{a^2}+\frac{n^2}{b^2}\right)^2+\frac{N}{D}\left(\frac{m}{\pi a}\right)^2\right]} \quad [3.3]$$

Onde D continua a representar o Módulo de Rigidez à flexão da placa:

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\upsilon^2)} \quad [3.2]$$

E onde *E* é o Módulo de Young do material constituinte da placa, *t* a espessura da placa e υ o coeficiente de Poisson.

Considerando novamente uma placa quadrada (1x1m), com 5mm de espessura, de uma liga de alumínio 5083, sujeita a um carregamento $q_0 = 1000Pa$ e tensão de compressão, no plano, uniforme de *N*=-1000Pa, tem-se:

$$Dados\begin{cases} E = 71E9Pa \\ \upsilon = 0.33 \\ q_0 = 1000Pa \\ N = -1000Pa \\ t = 5mm = 5E-3m \\ a = b = 1m \end{cases}$$

[21] Maan H. Jawad, *Theory and design of plates and shell structures*

O valor do Módulo de Rigidez à flexão (D) da placa vem igual ao valor calculado anteriormente, e a solução de Navier [3.3] pode reescrever-se na forma de:

$$w = \frac{16\times 1000}{\pi^6 829.966}\sum_m^{\infty}\sum_n^{\infty}\frac{\sin\frac{m\pi x}{1}\sin\frac{n\pi y}{1}}{mn\left[\left(\frac{m^2}{1^2}+\frac{n^2}{1^2}\right)^2+\frac{-1000}{829.966}\left(\frac{m}{\pi\times 1}\right)^2\right]}$$

Foram escolhidos três pontos representativos, como ilustrado na Figura 3.8, para o cálculo da deformada através da solução de Navier e posterior comparação com a solução numérica

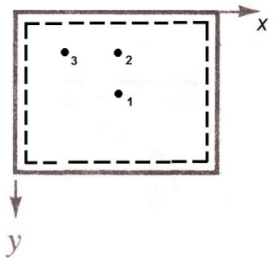


Figura 3. 8 - Pontos Representativos

- Ponto 1 (Ponto de deformada máxima a meio vão), coordenadas (0.5;0.5)
- Ponto 2, coordenadas (0.5;0.25)
- Ponto 3, coordenadas (0.25;0.25)

O valor de deformada obtida pela solução de Navier foi:

$$Ponto1: w_1 = 4.932E-3m$$
$$Ponto2: w_2 = 3.573E-3m$$
$$Ponto3: w_3 = 2.527E-3m$$

A placa em estudo foi então modelada em SolidWorks, através de elementos de tipo bidimensional xy (Figura 3.2).

Uma vez que se pretende simular a compressão no plano, uma das arestas da placa foi apoiada segundo a direcção horizontal, conseguindo-se assim pelo princípio do par acção reacção aplicar uma carga de compressão segundo a direcção horizontal.

A placa foi então sujeita às condições fronteira e carregamentos anteriormente referidos, como ilustrado na Figura 3.9.

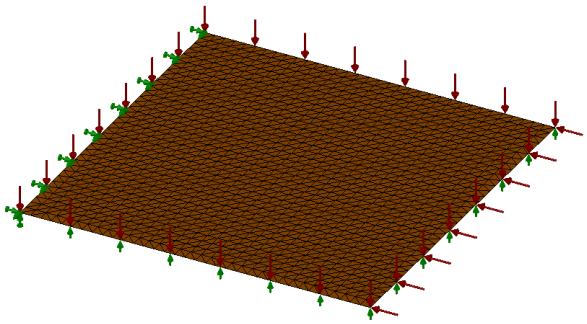


Figura 3. 9 - Modelação da Placa Sujeita a Carregamento Combinado

Retiraram-se os valores de deformada dos pontos 1, 2 e 3 e as conclusões encontram-se na tabela 3.2.

Tabela 3. 2 - Valores de Deformada Analítica vs. Cosmos (Carregamento Combinado)

	Deformada Analítica	Deformada em CosmosWorks	Diferença
Ponto 1	$w_1 = 4.962E-3m$	$w_1 = 4.965E-3m$	0.5%
Ponto 2	$w_2 = 3.573E-3m$	$w_2 = 3.565E-3m$	0.5%
Ponto 3	$w_3 = 2.772E-3m$	$w_3 = 2.770E-3m$	1.0%

3.2.3. Placa rectangular simplesmente apoiada em todas as arestas sujeita a Pressão Hidrostática *q*. Figura 3.10.

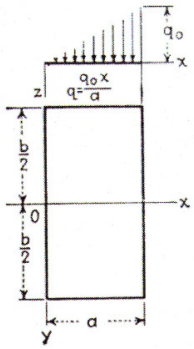


Figura 3. 10 - Placa Rectangular, simplesmente apoiada, sujeita a pressão hidrostática lateral

A expressão da deformada para este caso tem duas componentes [14][22]:

$$w = w_1 + w_2 \quad [3.4]$$

onde,

w_1 - Representa uma faixa da placa sujeita a carregamento triangular (dy/a)

w_2 - Representa o carregamento uniforme de y (dx/b)

Em que:

$$w_1 = \frac{2q_0 a^4}{\pi^5 D} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^{m+1}}{m^5} \sin \frac{m\pi x}{a} \quad [3.5]$$

$$w_2 = \frac{q_0 a^4}{D} \sum_{m=1}^{\infty} \left[A_m \cosh \frac{m\pi x}{a} + B_m \frac{m\pi y}{a} + \sinh \frac{m\pi y}{a} \right] \sin \frac{m\pi x}{a} \quad [3.6]$$

e D representa o Módulo de Rigidez à flexão da placa, sendo dado por:

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\upsilon^2)} \quad [3.2]$$

onde *E* representa o Módulo de Young do material constituinte da placa, *t* a espessura da placa e υ o coeficiente de Poisson. A_m e B_m são constantes determinadas através das condições de fronteira impostas à placa, ou seja:

$$w = 0 \; e \; \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = 0 \, para \; y = \pm \frac{b}{2}$$

$$\begin{cases} w = 0 \\ \dfrac{\partial^2 w}{\partial y^2} = 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \dfrac{2(-1)^{m+1} q_0 a^4}{\pi^5 m^5} + A_m \cosh \dfrac{m\pi x}{a} + B_m \dfrac{m\pi y}{a} + \sinh \dfrac{m\pi y}{a} = 0 \\ (2B_m + A_m) \cosh \dfrac{m\pi x}{a} + B_m \dfrac{m\pi y}{a} + \sinh \dfrac{m\pi y}{a} = 0 \end{cases}$$

Sendo que:

$$Em \; y = \pm \frac{b}{2}, \; \frac{m\pi y}{a} = \frac{m\pi b}{2a} = \alpha_m$$

[22] Reddy, J.N., Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells – Theory and Analysis, Second Edition

Resolvendo o sistema, obtêm-se:

$$A_m = \frac{(2+\alpha_m \tanh \alpha_m)(-1)^{m+1}}{\pi^5 m^5 \cosh \alpha_m}$$

$$B_m = \frac{(-1)^{m+1}}{\pi^5 m^5 \cosh \alpha_m}$$

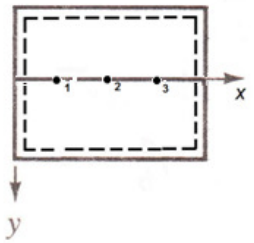
Demonstra-se no capítulo 5 da refreência bibliográfica [14][23] que a solução de Levy para a deformada da placa e carregamentos representados na Figura 3.10 vem na seguinte forma:

$$w = \frac{q_0 a^4}{D} \sum_{m=1}^{\infty} \left[\begin{array}{l} \dfrac{2(-1)^{m+1}}{\pi^5 m^5} + \dfrac{-\left(2+\dfrac{m\pi b}{2a}\tanh\dfrac{m\pi b}{2a}\right)}{\pi^5 m^5 \cosh\dfrac{m\pi b}{2a}} \cosh\dfrac{m\pi y}{a} + \\ \dfrac{(-1)^{m+1}}{\pi^5 m^5 \cosh\dfrac{m\pi b}{2a}} \dfrac{m\pi y}{a} + \sinh\dfrac{m\pi y}{a} \end{array} \right] \sin\frac{m\pi x}{a} \qquad [3.7]$$

Considerando novamente uma placa quadrada (1x1m), com 5mm de espessura, de uma liga de alumínio 5083 sujeita a pressão lateral hidrostática, tem-se:

$$Dados \begin{cases} E = 71E9Pa \\ \upsilon = 0.33 \\ q_0 = \rho g h = 1000 \times 9.81 \times 1 = 9810Pa \\ t = 5mm = 5E-3m \\ a = b = 1m \end{cases}$$

Foram igualmente escolhidos três pontos representativospara o cálculo da deformada através da solução de Navier e posterior comparação com a solução numérica (Figura 3.11).



- Ponto 1, coordenadas (0.25;0.00)
- Ponto 2, coordenadas (0.5;0.00)
- Ponto 3, coordenadas (0.75;0.00)

Figura 3. 11 - Pontos Representativos

[23] Reddy, J.N., Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells – Theory and Analysis, Second Edition

O valor de deformada obtida pela solução de Levy foi:

$$Ponto1: w_1 = 1.579E-3m$$
$$Ponto2: w_2 = 2.447E-3m$$
$$Ponto3: w_3 = 1.960E-3m$$

A placa em estudo foi então modelada em *SolidWorks* e sujeita às condições fronteira e carregamentos já referidos, como ilustrado na Figura 3.12.

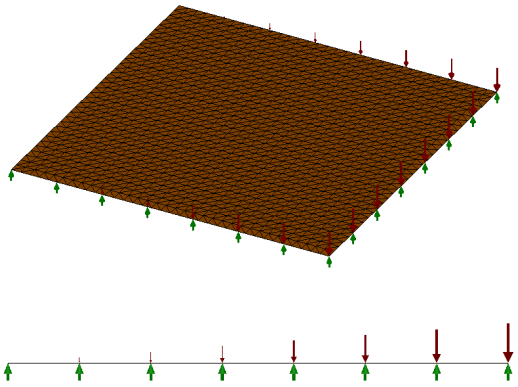


Figura 3. 12 - Modelação da Placa Sujeita a Pressão Lateral Hidrostática

Retiraram-se os valores de deformada dos pontos 1, 2 e 3 e as conclusões encontram-se na tabela 3.3.

Tabela 3. 3 - Valores de Deformada Analítica vs. Cosmos (Carregamento Hidrostático)

	Deformada Analítica	Deformada em *CosmosWorks*	Diferença
Ponto 1	$w_1 = 1.579E-3m$	$w_1 = 1.579E-3m$	0%
Ponto 2	$w_2 = 2.447E-3m$	$w_2 = 2.447E-3m$	0%
Ponto 3	$w_3 = 1.960E-3m$	$w_3 = 1.961E-3m$	0.01%

3.3. Análise de Resultados

Nos três casos de estudo apresentados, a diferença entre os valores obtidos por via analítica (Soluções de Navier e Levy) e os valores obtidos pelo Método de Elementos Finitos (SolidWorks/CosmosWorks) foi sempre inferior a 1.5%. Uma vez que tanto os carregamentos como as condições fronteira a que a que as Anteparas estão sujeitas foram simulados nos casos de estudo efectuados, estes possibilitaram a validação do *Software* SolidWorks/CosmosWorks para o estudo do comportamento estrutural das Anteparas dos Salva-Vidas da Classe Vigilante através do Método de Elementos Finitos.

4. Modelação 3D das Anteparas (MEF)

Com o objectivo de estudar o comportamento estrutural das Anteparas 3 e 17, quando submetidas aos carregamentos referidos no Capítulo 2 (*Slamming* e Pressão Hidrostática), estas foram modeladas com o *Software* SolidWorks e posteriormente obtidas as tensões de Von Mises, através dos *Softwares* de cálculo CosmosWorks e Ansys.

De modo a obter-se a contribuição e influência das deformações iniciais induzidas pelo processo de fabrico das Anteparas reforçadas, assim como dos reforços estruturais, na distribuição de tensões e no comportamento mecânico das estruturas analisadas, optou-se por fazer a modelação de várias configurações. Na Figura 4.1 estão representadas as várias configurações de Anteparas que foram modeladas.

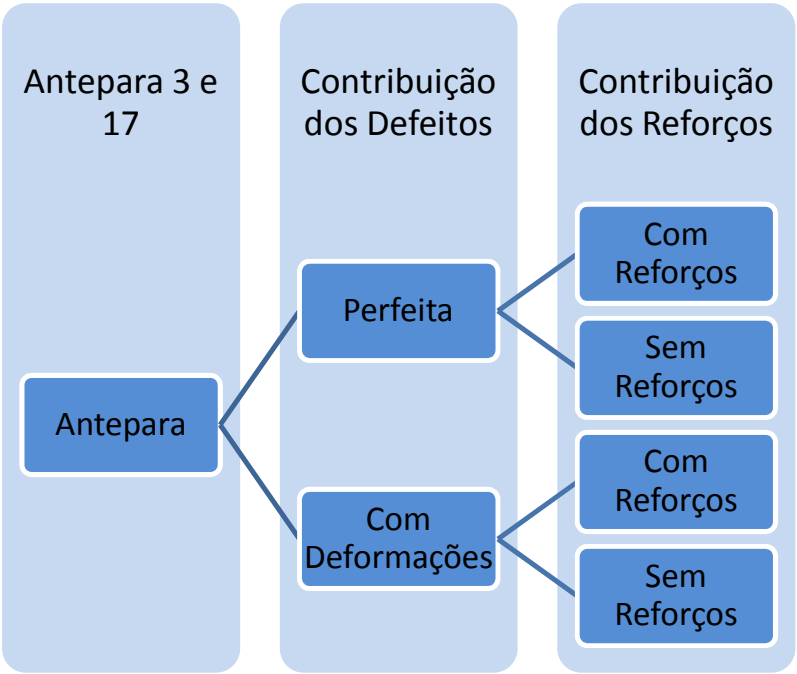


Figura 4. 1 - Configurações de Anteparas Modeladas

As chapas das Anteparas são painéis com pouca espessura em alumínio, e com a soldadura dos reforços à chapa esta sofre deformações, devido em grande parte às características do alumínio descritas no Capítulo 1. Estas deformações têm de ser atenuadas através de processos térmicos e físicos como a "martelagem" (tensões de compressão) ou "traccionamento" (tensões de tracção)

Os valores das deformadas foram retirados da referência bibliográfica [7][24], tendo sido obtidos por medição *in situ* de 45 pontos, correspondentes a 4 cotas analisadas por placa (Anexo 3).

Pode-se verificar na figura 4.2 a comparação entre os painéis reforçados sem deformações iniciais e com deformações iniciais. Na Figura 4.2a), está representada a Antepara 3, com e sem deformações iniciais; na Figura 4.2b) encontra-se a Antepara 17 com e sem deformações iniciais.

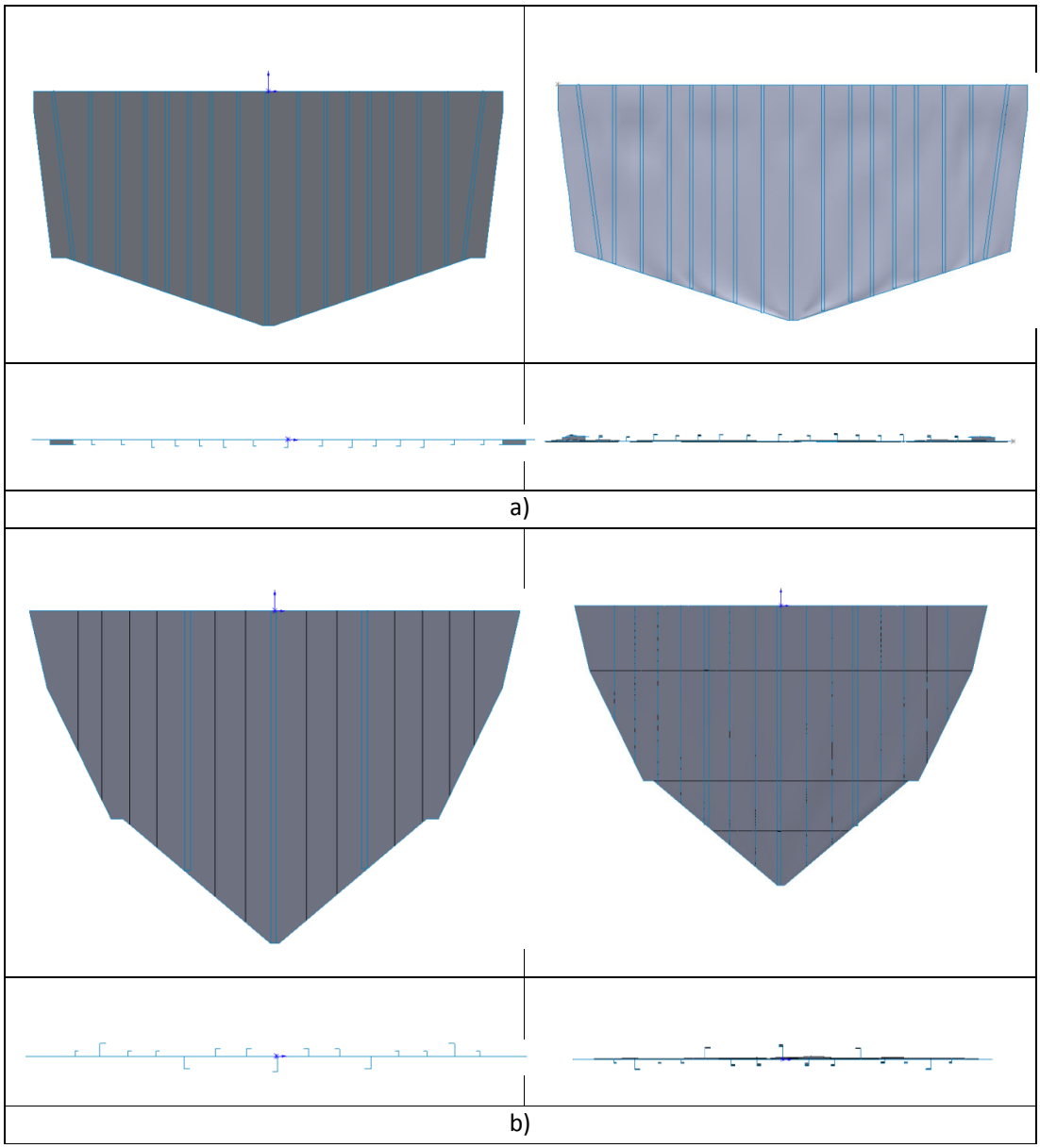


Figura 4. 2 – Antepara Perfeita vs. Antepara com defeitos iniciais. a) Antepara 3; b) Antepara 17

[24] Matos J. A. Boto, *Estudo do Comportamento mecânico/estrutural de painéis reforçados em ligas de alumínio de construção naval*, Julho de 2008

Na Figura 4.3a), está representada a Antepara 3, perfeita, com e sem reforços; na Figura 4.3b) encontra-se a Antepara 17 imperfeita, contendo deformadas introduzidas pelo processo de fabrico, com e sem reforços.

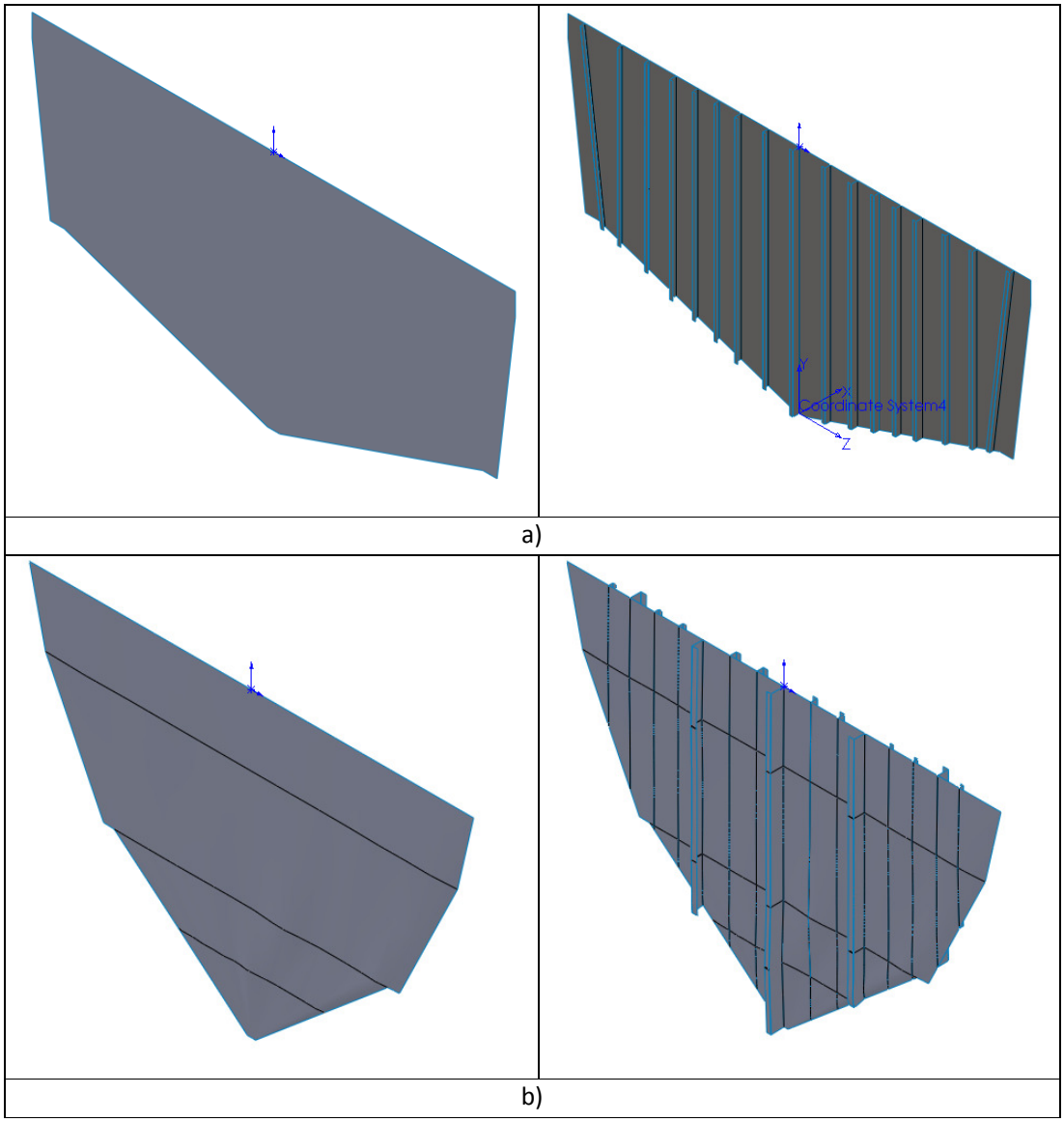


Figura 4. 3 - Exemplos de Anteparas modeladas. a) Antepara 3, perfeita, com e sem reforços; b) Antepara 17 imperfeita, com defeitos iniciais, com e sem reforços.

As condições fronteiras simplificadas que foram aplicadas a ambas as Anteparas, em todos os cenários visíveis na Figura 4.1, e que melhor representam o cenário real, ainda que com diferenças evidentes em relação às condições de serviço, são o encastramento no topo da Antepara, correspondendo à ligação da Antepara ao convés do navio e a condição de simplesmente apoiada nas restantes faces, correspondendo à ligação da Antepara com o casco do navio (Figura 4.4). O tipo de elemento finito utilizado em todas as análises realizadas foi o elemento bidimensional xy (placa/casca), que está apresentado na Fig. 3.2.

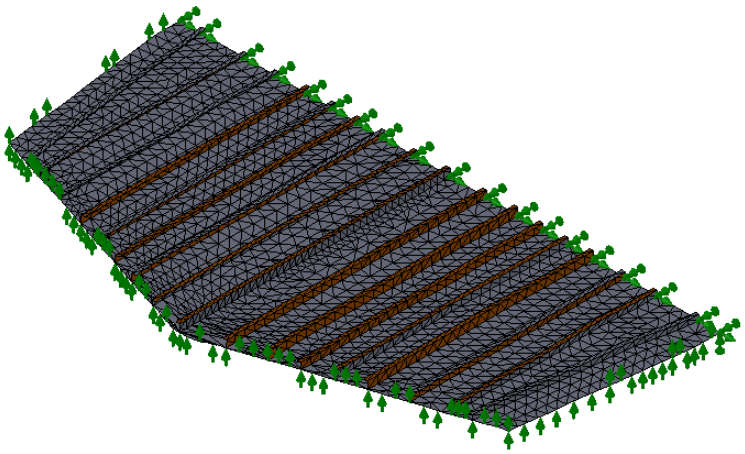


Figura 4. 4 - Antepara 3 com representação de malha de elementos finitos e condições fronteira.

A análise do comportamento estrutural global e local da lancha de salva-vidas da Classe Vigilante, necessária para a obtenção de valores de tensão e mais de acordo com a situação real, não fazia parte dos objectivos da presente tese, sendo, no entanto, um assunto de inegável importância, merecedor de desenvolvimentos futuros.

Quanto aos carregamentos aplicados nas Anteparas, existem duas hipóteses diferentes, tal como descrito no Capítulo 2:

- Carregamento de compressão no plano devido ao efeito de *Slamming*, a que corresponde a uma pressão de 150kPa;
- Carregamento no plano (150kPa) combinado com pressão lateral hidrostática (ou constante), devido ao hipotético alagamento total dos compartimentos estanques adjacentes (Figura 4.5).

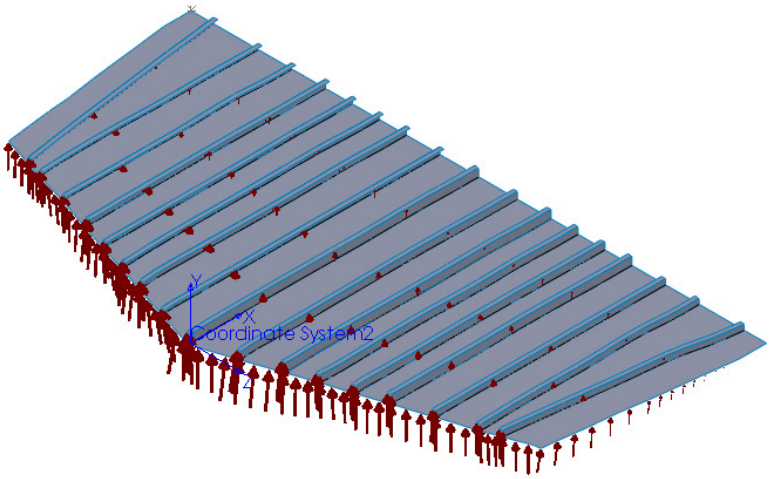


Figura 4. 5 - Antepara 3 real, com representação do carregamento no plano e pressão lateral hidrostática.

Obtiveram-se as várias distribuições de tensões, referentes aos diferentes casos de estudo, através dos *Softwares* CosmosWorks e Ansys.

Nos casos em que as Anteparas foram modeladas sem reforços, foram apenas simulados os carregamentos sem pressão lateral constante ou hidrostática, devido à impossibilidade de estas configurações suportarem as pressões referidas.

Foram escolhidos cinco pontos (Figuras 4.6 e 4.7), considerados representativos do comportamento estrutural de cada configuração de Antepara, que possibilitaram a comparação de resultados entre tensões de Von Mises, para os dois *softwares* utilizados.

Pontos Representativos:

1. Ponto de valor de tensão máxima (no reforço);
2. Ponto no reforço adjacente ao reforço central;
3. Ponto no reforço adjacente ao central na união com a placa;
4. Ponto da placa entre reforços;
5. Ponto num reforço, não central, não adjacente ao reforço central.

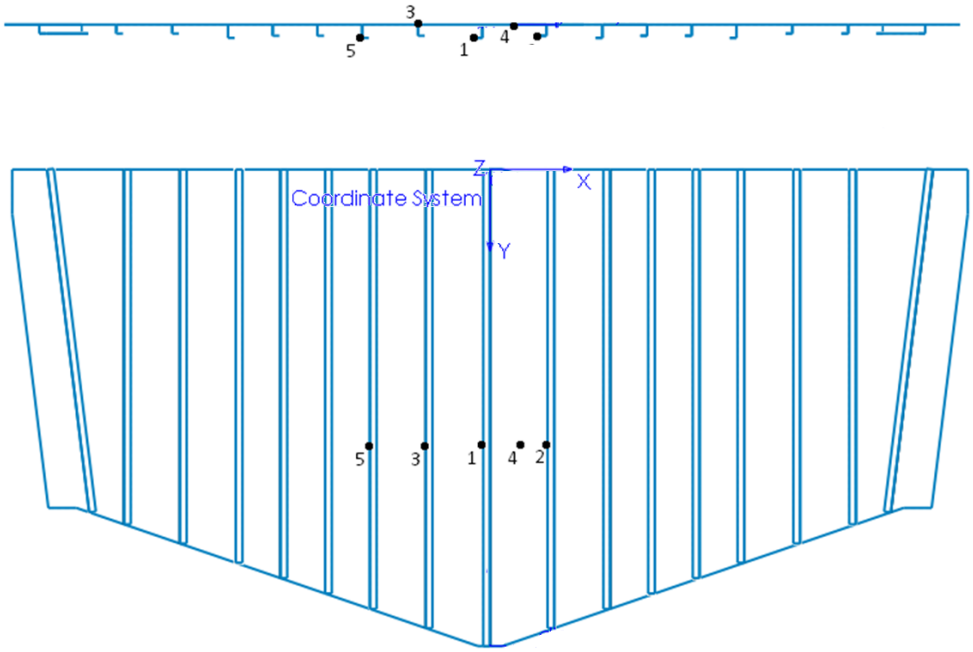


Figura 4. 6 - Antepara 3, vista de frente e em planta, contendo a posição dos pontos representativos.

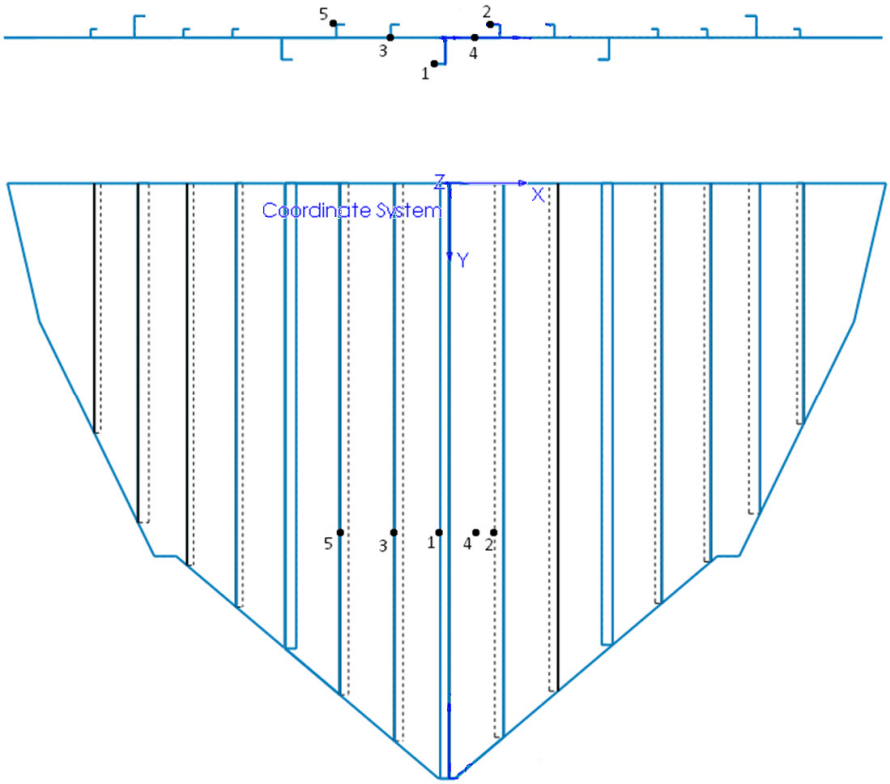


Figura 4. 7 - Antepara 17, vista de frente e de cima com a posição dos pontos representativos.

Mostram-se nas Figuras 4.8 e 4.9, os gráficos de tensões obtidos em CosmosWorks para a Antepara 3, imperfeita, só com carregamento no plano e carregamento combinado (no plano e pressão lateral hidrostática), respectivamente.

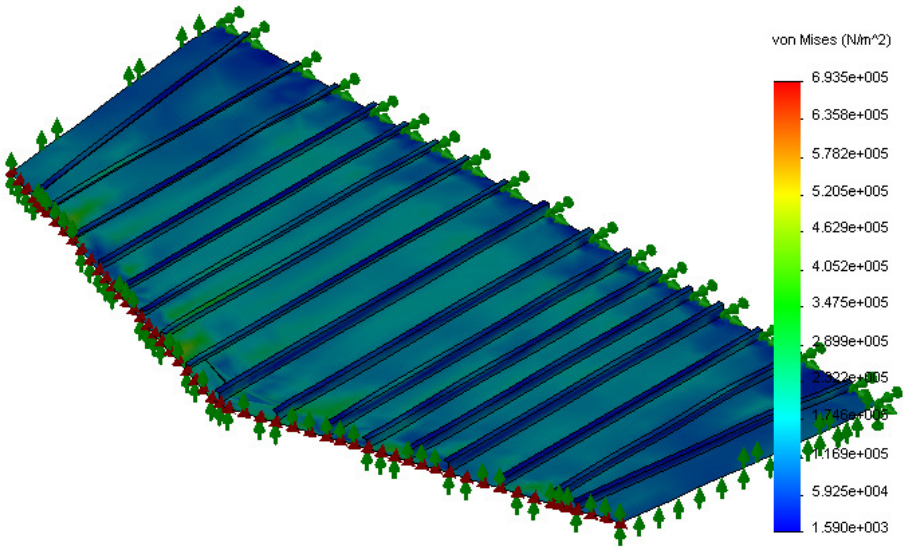


Figura 4. 8 - Antepara 3 real com carregamento exclusivamente no plano.

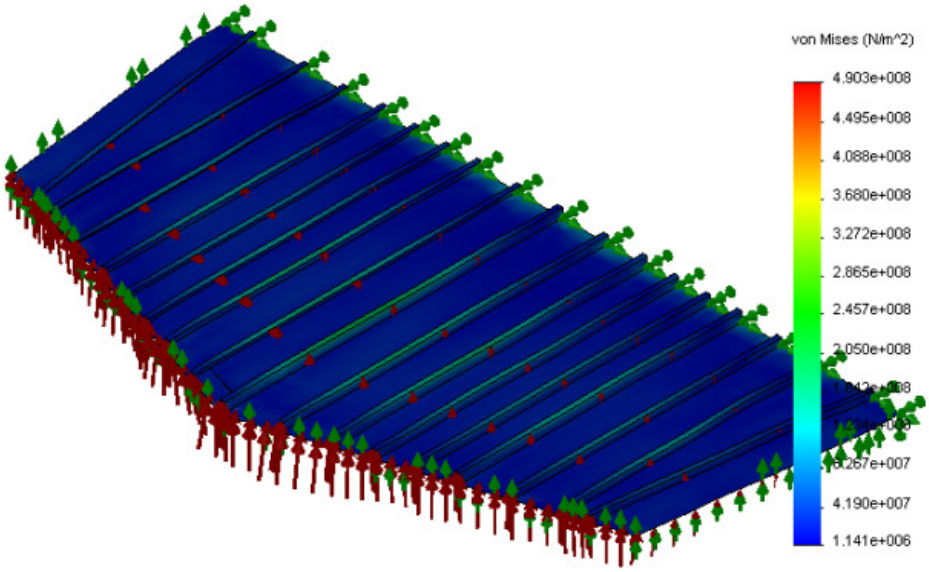


Figura 4. 9 - Antepara 3 real com carregamento combinado no plano e pressão lateral hidrostática.

No Anexo 4, encontram-se coligidos todos os resultados obtidos relativos aos diferentes estudos efectuados (Fig.4.1). No presente capítulo, apresentar-se-ão as conclusões que se puderam retirar dos referidos estudos.

Da análise dos resultados obtidos para os diferentes casos de estudo, conclui-se que:

- Para a situação de carregamento exclusivamente no plano, e para as duas anteparas em todas as configurações modeladas, os resultados – valores de tensões de Von Mises - são idênticos entre *ANSYS* e *CosmosWorks*. Verifica-se neste caso que os reforços sofrem pouca solicitação, pelo que a tensão máxima, excluindo as tensões obtidas junto das fronteiras, é induzida na chapa da Antepara e, como seria de esperar, equivalente à pressão de carregamento (máximo de 150kPa para a Antepara 3 perfeita e máximo de 175kPa para a Antepara 3 com deformações iniciais). O deslocamento máximo diminui substancialmente com a introdução dos reforços (até 95%, passando de 0,0394mm para 0,0037mm, conforme se mostra em Anexo 4, casos 1.3 e 1.4).
- Ainda para a situação de carregamento exclusivamente no plano, verifica-se que a existência de defeitos iniciais tem pouca influência e, em geral, as tensões induzidas na Antepara imperfeita são da mesma ordem de grandeza, quando comparadas com as tensões induzidas na Antepara perfeita (134kPa para a Antepara 17 perfeita e 132 kPa para a Antepara 17 com defeitos iniciais). O efeito dos defeitos é anulado com a introdução dos reforços (Anexo 4, casos 1.3 e 1.4);
- Para a situação de pressão lateral existem divergências (até 15%) entre os resultados obtidos através do ANSYS e do CosmosWorks. A esmagadora maioria destas diferenças verifica-se apenas no valor de tensão máxima obtido no reforço principal. Para a hipotética situação de alagamento total de um compartimento estanque adjacente, as

tensões máximas são induzidas nos reforços principais, devido à condição de vão máximo e de maior distância ao eixo neutro da Antepara, sendo, em geral, muito próximas das tensões de cedência da liga de alumínio utilizada (200MPa), enquanto que as tensões na chapa da Antepara não excedem os 35MPa (Anexo 4, casos 2.3 e 2.4). À semelhança do verificado para o carregamento exclusivamente no plano, para este tipo de carregamento os defeitos de fabrico têm pouca influência e as tensões sentidas nas Anteparas com defeitos são, de um modo geral, até ligeiramente mais baixas, devido aos efeitos de membrana que ocorrem para estas situações;

- As tensões resultantes do carregamento lateral hidrostático são sempre inferiores às introduzidas pelo carregamento lateral constante para as duas Anteparas modeladas em cerca de 40% passando de 166MPa para 251MPa para a Antepara 17 conforme se mostra em Anexo 4, casos 2.1 e 2.3.

5. Extensometria

Uma vez obtidos os valores de tensões induzidos nas anteparas perfeitas e imperfeitas em estudo, para os carregamentos estáticos anteriormente referidos, recorreu-se à aplicação de extensómetros na chapa da antepara nº17, com o objectivo de se obterem os valores de extensão reais, de natureza dinâmica, existentes na Antepara.

Uma vez que a tensão é uma grandeza que não se pode medir directamente, os métodos experimentais assentam na medição de extensões, que são depois convertidas em valores equivalentes de tensão. Para tal, é necessário dispor de sensores – chamados extensómetros -, solidários às estruturas, que indiquem o valor de extensão instantânea induzida. A técnica de medição descrita é designada por extensometria.

Ficam, em seguida, alguns dos conceitos principais de extensometria.

5.1. Conceitos de Extensometria

A extensão é medida em termos de variação de comprimento unitário ($\Delta L/L$). Por isso, trata-se de uma grandeza adimensional, que está associada a uma deformação e que se denomina por microextensão ($\mu\varepsilon$). [15][25]

Existem três etapas fundamentais no ritual experimental de obtenção de tensões através da medição de extensões. O primeiro está ligado à selecção dos extensómetros e à sua colagem nas regiões escolhidas na peça (Subcapítulo 5.1.1). O segundo envolve a utilização de instrumentos – pontes extensométricas – que permitem obter sinais eléctricos proporcionais às extensões a medir (Subcapítulo 5.1.2). O último passo respeita à tradução dos valores medidos, convertendo as extensões em tensões (Subcapítulo 5.1.3). [15][25]

5.1.1. Extensómetros, Seus Conceitos e Procedimentos Típicos de Colagem

O extensómetro metálico de resistência, Figura 5.1, é um condutor sensível à sua deformação longitudinal e colado sobre um pedaço de papel ou base de resina. A secção do filamento condutor é, normalmente, rectangular conferindo assim um elevado valor para a razão área de contacto/área da secção transversal o que beneficia o poder adesivo entre a grelha e a base. [16][26]

[25] António P. Vale Urgueira, *Fundamentos de Extensometria Eléctrica*, Outubro de 2006

[26] Prof. Valner Brusamarello, *Células de Carga*

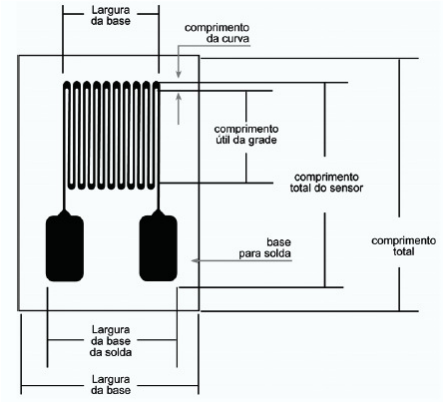


Figura 5. 1 - Extensómetro tipo Grelha Laminar

Pode admitir-se, em primeira análise, que o filamento do extensómetro está submetido às mesmas deformações que a superfície sobre o qual está colado. Se considerarmos um filamento sujeito à tracção, dentro do seu domínio elástico, este alongar-se-á sob o efeito da carga e a sua secção diminuirá devido ao efeito de Poisson, como ilustrado na Figura 5.2. [15][27]

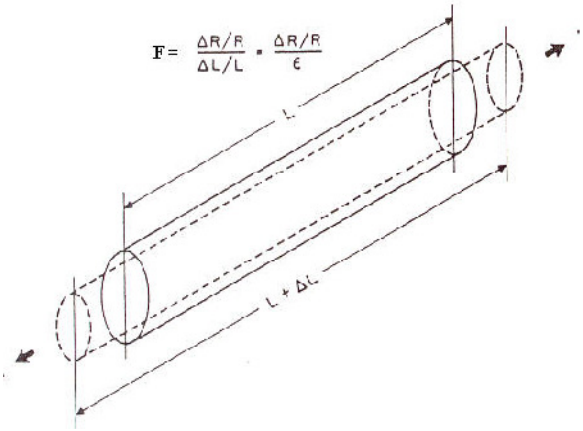


Figura 5. 2 - Efeito de Poisson em Filamento Sujeito à Tracção

O aumento de comprimento é acompanhado por uma diminuição da área da secção transversal e vice-versa. Adicionalmente, a resistividade do material também pode variar. Estas três possíveis variações, no comprimento, na área da secção e na resistividade, quando combinadas, produzem uma alteração na resistência eléctrica do condutor. A variação da resistência em função da variação do comprimento mede a sensibilidade do material do condutor. Esta relação é adimensional e designa-se por sensibilidade ou factor do extensómetro. [15][27]

[27] Urgueira, António P. Vale, *Fundamentos de Extensometria Eléctrica*, Outubro de 2006

Para um condutor linear e de secção transversal uniforme este factor é expresso por:

$$F = \frac{\Delta R / R}{\Delta L / L} = \frac{\Delta R / R}{\varepsilon} \quad [5.1]$$

Ou mais simplesmente:

$$\frac{\Delta R}{R} = F \times \varepsilon \quad [5.2]$$

Onde:

- F – factor do extensómetro (adimensional)
- R – resistência do extensómetro (ohm)
- L – comprimento (m)
- ΔR, ΔL – variações da resistência e do comprimento, respectivamente (ohm, m)

Por outras palavras a extensão é igual à variação de resistência unitária dividida pelo factor do extensómetro.

Para a selecção do extensómetro é necessário ponderar todos os parâmetros intervenientes para a sua aplicação e conhecer as características dos extensómetros. Os factores que deverão ser considerados incluem: [17][28]

- O tipo de material a ensaiar;
- A gama de temperatura de operação;
- As condições ambientais;
- As exigências em termos de exactidão;
- As condições de teste (estático/dinâmico);
- A simplicidade e facilidade de instalação.

A instalação e as características operacionais do extensómetro são afectadas por muitos factores, tais como, a liga do elemento resistivo, o material de suporte, o comprimento e configuração do extensómetro ou o factor de extensómetro. [17][28]

Para minimizar os erros devidos aos gradientes de deformação ao longo da área do extensómetro, a dimensão do extensómetro deverá ser pequena em relação às dimensões das irregularidades geométricas imediatamente adjacentes. [17][28]

Os fabricantes de extensómetro fornecem através de catálogos os vários factores que afectam a selecção dos extensómetros, bem como quais os que se adequam ao tipo de teste pretendido.

[28] Barreira, Luísa, *Introdução à Extensometria*, 2007

Uma outra etapa crucial na utilização das técnicas de extensometria é a colagem do extensómetro no local da peça previamente definido. De maneira a obterem-se bons resultados na colagem de extensómetros, é essencial dar um acabamento à superfície onde os mesmos serão colocados.

Para fazer a preparação da superfície, deve-se proceder da seguinte forma: [17][29]

- Remover a ferrugem/óxidos, tintas e rebardas do corpo de prova, utilizando para isso uma mini rebarbadora ou lixa. A área a ser limpa deve ser substancialmente maior do que a área de colagem e, de preferência, deve ficar um pouco áspera, ao invés de polida.
- Com a área de colagem preparada de acordo com o parágrafo anterior, deve proceder-se a uma última lixagem, passando a lixa em duas direcções ortogonais entre si e que formam um ângulo de 45º com a direcção preferencial do extensómetro.
- Realiza-se, em seguida, com uma caneta metálica, as marcações dos eixos de posicionamento do extensómetro no lugar de colagem e posteriormente efectua-se uma última limpeza com um algodão, de modo a remover quaisquer gorduras que possam ter ficado na peça de teste.
- Procede-se então ao posicionamento dos extensómetros. Normalmente são usadas fitas adesivas, que são presas nas extremidades da base do extensómetro. Espalha-se em seguida a cola no corpo de teste e no extensómetro e desce-se lentamente o extensómetro até à sua localização verificando sempre as marcações.
- Colocam-se então uma fita de plástico antiaderente e as pinças de mola, ou simplesmente pressiona-se, de modo a que seja fornecida a correcta pressão, temperatura e tempo de cura definida pelo fabricante da cola.
- Depois da colagem e da soldadura dos fios aos terminais do extensómetro deve ser colocada uma camada de verniz ou resina protectora na área do extensómetro, de modo a protegê-lo dos elementos ambientais.

No Anexo 5 incluem-se os procedimentos típicos de tratamento de superfícies, colagem dos extensómetros, soldadura dos terminais e protecção do extensómetro.

5.1.2. Instrumentos de Medição, Ponte de Wheatstone [15] [30]

Teoricamente podiam-se medir as variações de resistência eléctrica dos extensómetros através de um ohmímetro. Porém, estes instrumentos não são suficientemente sensíveis às pequenas variações de resistência que se obtêm dos extensómetros.

A variação de resistência (ΔR) é uma quantidade muito pequena e que resulta da subtracção de dois valores de resistência medidos - a resistência inicial (R0) e a resistência final sob a acção da carga (R1). Se o valor de R (a resistência nominal do extensómetro e o denominador de ΔR /R) for conhecido com a precisão de ± 1 %, os valores da extensão serão conhecidos também com a mesma precisão. As resistências R0 e R1 cuja diferença é ΔR devem ser

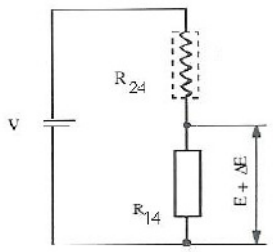
[29] Barreira, Luísa, *Introdução à Extensometria*, 2007
[30] Urgueira, António P. Vale, *Fundamentos de Extensometria Eléctrica*, Outubro de 2006

conhecidas com uma precisão de um milésimo de 1% ou melhor, uma vez que na subtracção os primeiros quatro ou mais algarismos significativos são anulados.

Os extensómetros são então incorporados num circuito eléctrico suficientemente sensível à variação de corrente através do extensómetro ou à variação de voltagem nos seus terminais, fornecendo assim uma indicação da variação da sua resistência. O sinal de saída pode ser amplificado e se necessário registado por vários processos. O sinal de entrada é necessariamente regulado em termos de voltagem ou de corrente.

Os circuitos mais utilizados são a meia-ponte (Potenciómetro) ou ponte completa (Ponte de Wheatstone) representados nas Figuras 5.3 e 5.4 respectivamente. Das duas, a mais popular é a ponte completa, mas em certas situações torna-se vantajoso utilizar a meia-ponte.

Meia Ponte:



$$\Delta E = V \frac{a}{(1+a)^2} \left(\frac{\Delta R_{14\cdot}}{R_{14}} - \frac{\Delta R_{24\cdot}}{R_{24}} \right). \ (1-n)$$

em que $\frac{R_{24\cdot}}{R_{14}} = a$ e $n = \frac{1}{1 + \frac{1+a}{\frac{\Delta R_{14\cdot}}{R_{14}} + a\frac{\Delta R_{24\cdot}}{R_{24}}}}$

Figura 5. 3 – Potenciómetro.

Ponte Completa:

A fonte de potência tem normalmente uma voltagem, V, constante, embora as fontes com corrente constante possam oferecer algumas vantagens. A maioria dos extensómetros disponíveis no mercado está indicada para uma utilização com voltagem constante, que varia normalmente entre 2-15 V.

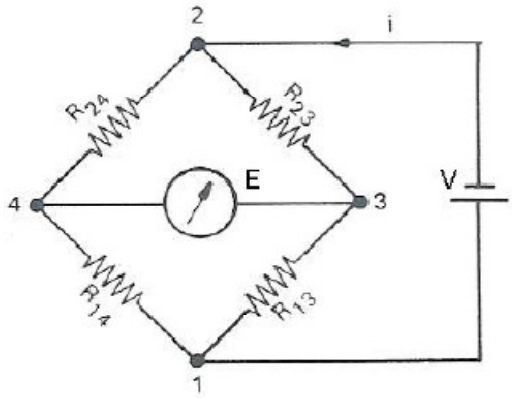


Figura 5. 4 - Ponte de Wheatstone

O cálculo da voltagem de saída (E) da ponte de Wheatstone é um problema de física elementar, com base nas Leis de Ohm e Kirschoff relativas às intensidades de corrente e tensões.

$$E = V.\left(\frac{R_{24}}{R_{14} + R_{24}} - \frac{R_{23}}{R_{13} + R_{23}} \right) \quad [5.3]$$

Por exemplo se a resistência R24 variar ligeiramente, o equilíbrio é destruído. Podemos medir a variação de resistência pela corrente ou tensão de desequilíbrio ou restabelecê-lo através de uma variação conhecida das outras três resistências.

Supondo que:

R24 = R23 = R13 = R24, ou R24 x R13 = R23 x R14

Qualquer voltagem que seja aplicada à entrada (E), a saída (V) deverá manter-se em zero, considerando-se que a ponte está estável e que nehuma solicitação foi feita ao(s) extensómetro(s) activo(s). Sendo assim, quando a ponte perde a sua estabilidade, verifica-se uma voltagem à saída, que corresponde a mudanças de resistência.

Existem várias possibilidades de ligação em ponte de Wheatstone com um extensómetro num dos ramos da ponte ou vários extensómetros ligados com configurações que possibilitam entre outros casos a melhoria da precisão das medições com por exemplo:

- Compensação do aumento de temperatura devido ao aumento da resistência nos extensómetros;
- Cancelamento do efeito térmico dos fios de ligação e o seu consequente aumento de resistência;
- Compensação do efeito de aplicação de momento flector aos extensómetros;

5.1.3. Conversão de Extensões em Tensões, Lei de Hooke

A Figura 5.5 mostra a relação existente entre a tensão e a deformação de um corpo de prova de aço submetido a um carregamento de tracção. A tensão é proporcional à deformação, entre a origem e o ponto *a*, onde se pode obter uma inclinação aproximadamente linear. Esta é a chamada região elástica, onde se pode aplicar a Lei de Hooke. [15], cuja expressão é :

$$\sigma = \varepsilon \times E \quad [5.4]$$

e onde E representa uma constante de proporcionalidade conhecida como Módulo de Elasticidade longitudinal ou Módulo de Young. Deste modo, uma vez conhecido o valor de deformação através do extensómetro instalado na estrutura, ε, facilmente se calcula a tensão a que está sujeita. Para além do regime elástico do material, a técnica da extensometria não é aplicável, uma vez que a deformação permanente aplicada à estrutura fará com que o extensómetro se descole da superfície onde estava solidário.

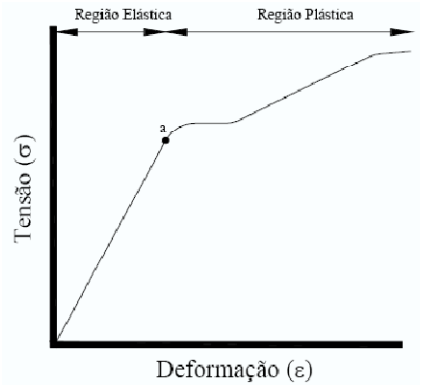


Figura 5. 5 - Tensão vs Deformação

5.2. Experiências de Validação das Técnicas Extensométricas utilizadas – Ensaios estáticos e dinâmicos

Realizaram-se experiências de natureza estática e dinâmica, que tiveram lugar na Divisão de Laboratórios e Qualidade (DLQ) do Arsenal do Alfeite (AA), de modo a possibilitar um primeiro contacto com o uso dos instrumentos de medição (ponte extensométrica), com as técnicas de colagem, etc., e de modo a se validarem as técnicas de extensometria utilizadas.

O instrumento de medição utilizado nos ensaios foi a ponte multipontos, marca HBM, modelo UPM60 que se encontra ao serviço na DLQ do AA (Figura 5.6). Esta é uma unidade multimodular com capacidade para 6 unidades de pesquisa UMH, para um máximo de 60 pontos de medição, entre as quais, pontes extensométricas, PT 100, termopares, medidores de tensão e de corrente eléctrica. Para a saída directa dos dados, possui uma impressora térmica interna e a comunicação com o computador é possível através das interfaces RS232c ou IEEE488.

Nos ensaios de extensometria optou-se pelo uso do Módulo UMH 3209 (Figura 5.6) pois este permite a Leitura de até 10 pontos de medição, com tomadas de 72 pólos para ligação de extensómetros individuais com uma resistência suplementar comum ou extensómetro de compensação.

Em todos os ensaios utilizou-se o esquema de ligação 9A, indicado no manual do equipamento (Anexo 6 do presente documento), que utiliza, na ponte de Wheatstone, um circuito em ¼ de ponte com um extensómetro activo, e três resistências fixas. Esta montagem foi utilizada tanto para as medições estáticas como para as dinâmicas.

Na Figura 5.6 está representado o instrumento de medição utilizado, HBM UPM60, assim como uma placa contendo 10 pontos de medição com ligação ao Módulo UMH 3209.

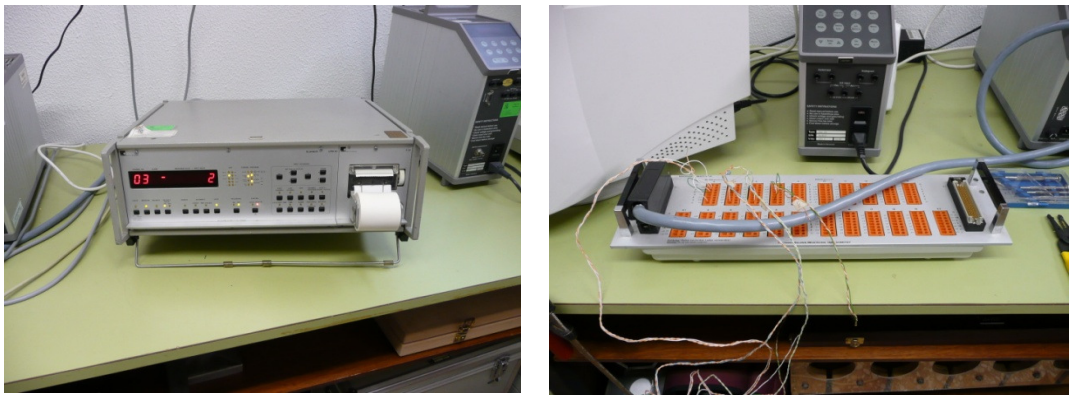


Figura 5. 6 - Aparelhos de Medição (à esquerda HBM UPM60 e à direita placa com 10 pontos de medição (Módulo UMH 3209)

5.2.1. Ensaio Experimental 1 (Estático)

Realizou-se um primeiro ensaio, com o objectivo de determinar experimentalmente a extensão, e consequente tensão, em dois pontos de uma viga de secção rectangular, em aço, encastrada numa extremidade e sujeita a aplicações de carga estática na extremidade livre, Figura 5.7. A viga tinha dois extensómetros com 120Ω de resistência, colados e alinhados ao longo do seu eixo longitudinal, à distância de 241mm e 287mm do ponto de aplicação da carga (Figura 5.7). O encastramento da viga foi simulado, fixando-a a uma bancada por intermédio de um grampo, como é visível na Figura 5.8.

Pretendia-se comparar os resultados obtidos por via experimental com os obtidos por via teórica e assim validar as técnicas de extensometria utilizadas no desenvolvimento do modelo experimental.

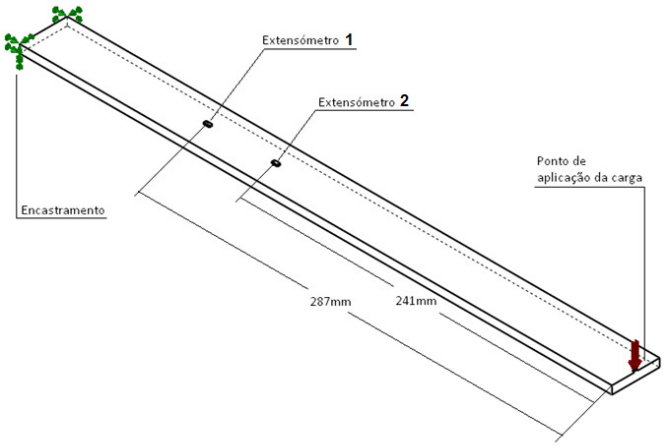


Figura 5. 7 - Esquema de viga utilizada na montagem experimental 1

Figura 5. 8 - Viga de secção rectangular (simulação de encastramento)

Foram efectuadas as ligações dos extensómetros ao Módulo UMH3209 e estes foram conectados à unidade HBM-UPM60, ficando a configuração da ponte de Wheatstone da forma ilustrada na Figura 5.9.

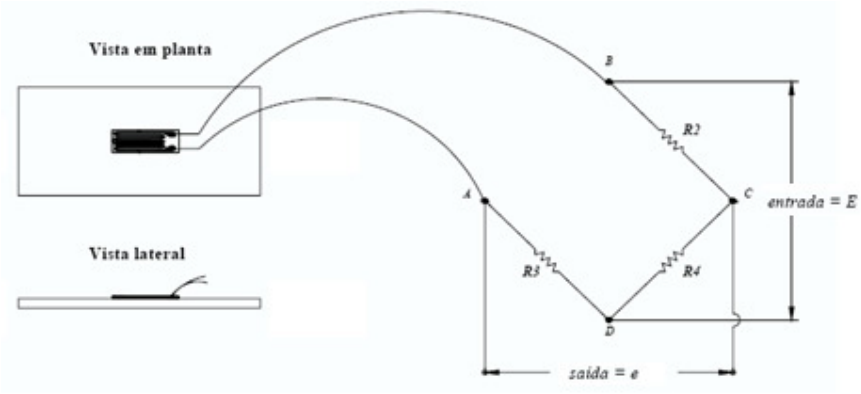


Figura 5. 9 - Esquema de ligação extensómetro/ponte de Wheatstone

As ligações entre a HBM e o computador, através da interface RS232c, foram posteriormente efectuadas, de modo a registarem-se as medições de extensão através do *Software* de aquisição de sinal *Catman V1.02,* existente no DLQ do AA. O esquema da montagem encontra-se na Figura 5.10.

Efectuaram-se vários carregamentos crescentes na extremidade da viga e registaram-se (Tabela 5.1) as extensões lidas no mostrador digital da HBM e através do *Software* Catman (Figura 5.11), correspondentes aos dois extensómetros alinhados com o eixo da viga.

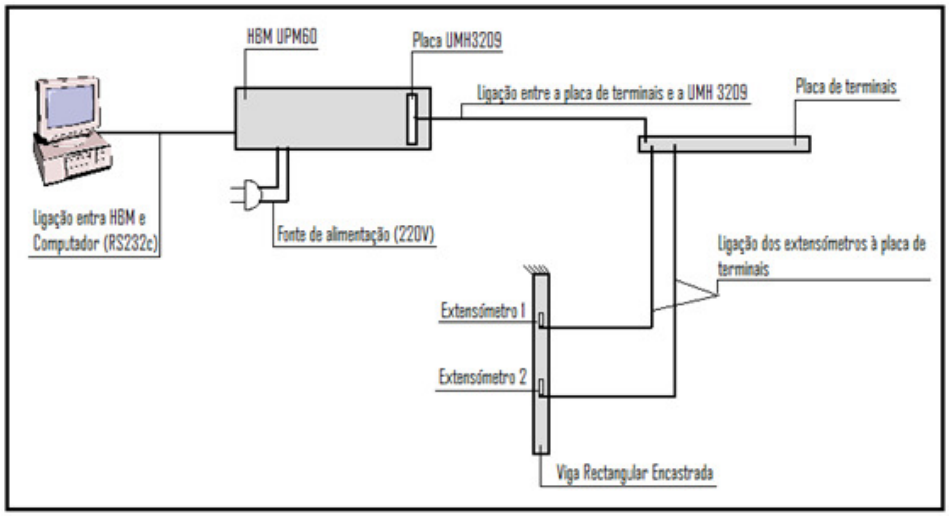


Figura 5. 10 - Configuração da montagem experimental 1

Tabela 5. 1 - Carregamentos e Leituras de extensão correspondentes para os extensómetros 1 e 2.

Extensómetro1

d=0,287m

Massas	kg
Massa 4	0,386
Massa 6	0,379
Massa 15	0,394
Massa 20	0,383
Suporte	0,025

Carregamentos		kg	με(HBM)	με(Catman)
1	4	0,411	40,3	41
2	4+6	0,79	78,4	79
3	4+6+15	1,184	116,9	118
4	4+6+15+20	1,567	154,4	158

Extensómetro2

d=0,241m

Massas	kg
Massa 4	0,386
Massa 6	0,379
Massa 15	0,394
Massa 20	0,383
Suporte	0,025

Carregamentos		kg	με(HBM)	με(Catman)
1	4	0,411	35,1	36
2	4+6	0,79	67,2	68
3	4+6+15	1,184	100,7	101
4	4+6+15+20	1,567	132,6	135

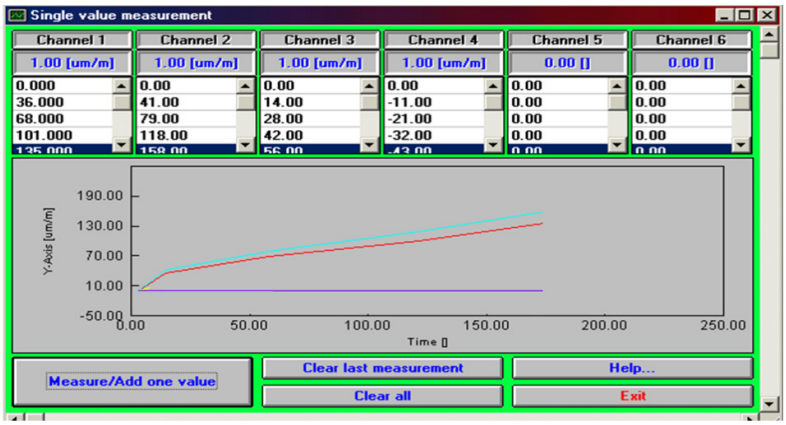


Figura 5. 11 - Gráfico obtido através do Catman para os extensómetros 1 e 2 (teste estático).

Pode-se verificar na Figura 5.11 que se estão a medir 4 canais, isto deve-se ao facto de um dos extensómetros ser uma roseta, contendo assim 3 extensómetros desfazados de 45º em que um deles (canal 2), e que interessa para o presente estudo, se encontra alinhado com o eixo da viga.

De modo a validarem-se os resultados experimentais, procedeu-se, por via analítica (Teoria de Vigas), ao cálculo das tensões induzidas pelos carregamentos, nos locais onde se encontravam os extensómetros.

Pela Teoria de Vigas, e para o cálculo do valor de tensão num ponto de uma viga encastrada (Figura 5.12), tem-se:

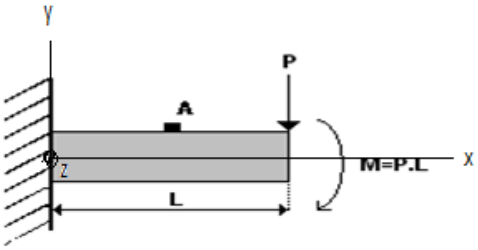


Figura 5. 12 – Viga encastrada numa extremidade e livre na outra. Carregamento estático.

Para o cálculo do valor de tensão induzido num qualquer ponto da viga temos:

$$\sigma_{xx} = \frac{Mz}{Iz} \times y \; [MPa] \; [5.5]$$

Onde σ_{xx} é a tensão induzida segundo a direcção do eixo dos x's[Mpa], Mz é o momento induzido pela carga P em torno do eixo z, e Iz o momento de inércia relativo ao eixo z (Figura 5.12), que vem igual a:

$$Mz = P \times d \; [N.m] \; [5.6]$$

Onde P é a carga aplicada na extremidade livre da viga e d representa a distância entre esta e o ponto onde se pretende conhecer a tensão, para o caso em estudo, o ponto onde se encontram os 2 extensómetros. O momento de inércia Iz da secção resistente é dado por:

$$Iz = \frac{b \times h^3}{12} \ [m^4] \ [5.7]$$

Onde b é o comprimento da secção da viga, e h a altura da mesma.

Para a viga em estudo:

- b = 32.2mm
- h = 5.5mm

$$Iz = \frac{b \times h^3}{12} = \frac{0{,}0322 \times 0{,}0055^3}{12} = 4.46 \times 10^{-10} [m^4]$$

Como exemplo de cálculo para o momento induzido consideremos o carregamento 4 (Tabela 5.1), que corresponde a P = 1.567kg = 15.37N:

- Extensómetro 1: $M_{Z1} = P \times d = 15.37 \times 0.287 = 4.4 \ [N.m]$
- Extensómetro 2: $M_{Z1} = P \times d = 15.37 \times 0.241 = 3.7 \ [N.m]$

Sendo assim:

- Extensómetro 1: $\sigma_{xx} = \frac{M_{Z1}}{Iz} \times y = \frac{4.4}{4.46 \times 10^{-10}} \times 0.00275 = \ 27.18 \ MPa$
- Extensómetro 2: $\sigma_{xx} = \frac{M_{Z2}}{Iz} \times y = \frac{3.7}{4.46 \times 10^{-10}} \times 0.00275 = \ 22.82 \ MPa$

Aplicando a Lei de Hooke que relaciona a extensão e tensão:

$$\sigma = \varepsilon \ \times E \ [MPa] \ [5.4]$$

- Extensómetro 1: $\varepsilon_{xx} = \frac{\sigma}{E} = 27.18 \times 10^6 / 200 \times 10^9 = \ 136 \mu\varepsilon$
- Extensómetro 2: $\epsilon_{xx} = \frac{\sigma}{E} = 22.82 \times 10^6 / 200 \times 10^9 = \ 114 \mu\varepsilon$

ATabela 5.2 permite comparar os valores teóricos calculados com os valores práticos obtidos.

Tabela 5. 2 - Comparação entre valores teóricos e práticos e suas diferenças.

Extensómetro1					
Carregamento	σ (teórico) [MPa]	σ (prático) [MPa]	Diferença [%]	με (prática)	με (teórica)
1	7,13	8,06	11,54	40,3	35,6
2	13,7	15,68	12,63	78,4	68,5
3	20,53	23,38	12,19	116,9	103
4	27,18	30,88	11,98	154,4	136
Extensómetro2					
Carregamento	σ (teórico) [Mpa]	σ (prático) [Mpa]	Diferença [%]	με (prática)	με (teórica)
1	5,99	7,02	14,67	35,1	29,9
2	11,5	13,44	14,43	67,2	57,5
3	17,24	20,14	14,40	100,7	86,2
4	22,82	26,52	13,95	132,6	114

A análise dos resultados permitiu concluir que:

- A primeira medição (Catman) tem valor zero, que corresponde ao balanço das pontes dos extensómetros para a situação de não aplicação de carga.
- Os dados obtidos através do uso do Software *Catman* são equivalentes aos obtidos pela Leitura do mostrador da HBM, embora com tendência para terem um valor de extensão mais elevado (Tabela 5.1).
- As diferenças obtidas entre os valores teóricos e experimentais são inferiores a 15% (Tabela 5.2). Este facto pode ser explicado por não se conhecer qual o Módulo de Young exacto para o aço em questão, não se conhecer o factor de extensómetro para os extensómetros instalados na viga. Concomitantemente, a simulação de encastramento foi efectuada através de um grampo, pelo que o encastramento não era real e os carregamentos foram efectuados com um suporte, que consistia de um estojo e um clip, o que resultou numa provável fonte de erro.

5.2.2 Ensaio Experimental Dinâmico

No ensaio experimental 1 (Subcapítulo 5.2.1) validaram-se os resultados obtidos por via experimental, para carregamentos estáticos, mas uma vez que os carregamentos resultantes do efeito de *Slamming* induzem tensões dinâmicas nas Anteparas, foi necessário proceder-se a um ensaio experimental de aquisição de dados provenientes de carregamentos dinâmicos com o objectivo de verificar a frequência máxima de aquisição de dados por parte da HBM.

Para tal, foi construída nas oficinas do Arsenal do Alfeite uma viga semelhante à do ensaio estático, mas em liga de alumínio, de secção rectangular (30x2mm) e 40mm de comprimento, representada na Figura 5.13.

Figura 5. 13 - Viga de Alumínio

Procedeu-se à colagem de dois extensómetros na viga de alumínio, tendo em conta as técnicas de colagem referidas no Subcapítulo 5.1.1. Foram utilizados para o tratamento das superfícies de colagem dos extensómetros:

- Condicionadores;
- Neutralizadores;
- Catalisadores;
- Cola baseada na resina cianeto-acrilato;
- Verniz protector.

Colocaram-se, no Anexo 7, algumas imagens retiradas durante o processo de tratamento das superfícies, da colagem dos extensómetros e da soldadura dos terminais.

À semelhança do que foi feito no ensaio experimental 1 (estático), os extensómetros foram posicionados ao longo do eixo da viga e a sua distância ao ponto de aplicação da carga era de 250mm para o extensómetro 1 e 150mm para o extensómetro 2 (Figura 5.14).

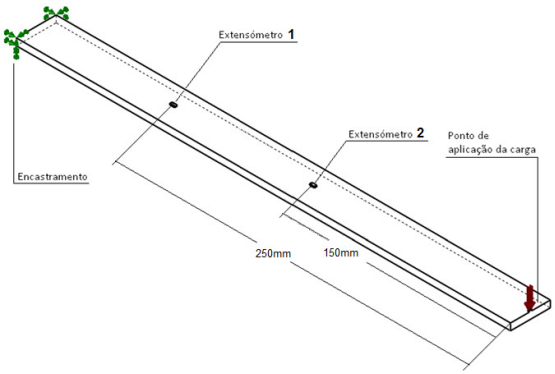


Figura 5. 14 - Esquema da viga de alumínio. Ensaio experimental 2

De modo a induzir carregamentos dinâmicos à viga, e consequentes extensões dinâmicas aos extensómetros, esta foi encastrada numa das extremidades por intermédio de um grampo e à extremidade livre foi ligado um oscilador e respectivo controlador da DLQ do AA, da marca *Brüel & Kjær,* o qual permite aplicar frequências de oscilação de 10Hz a 10kHz. A montagem do equipamento está representada na Figura 5.15.

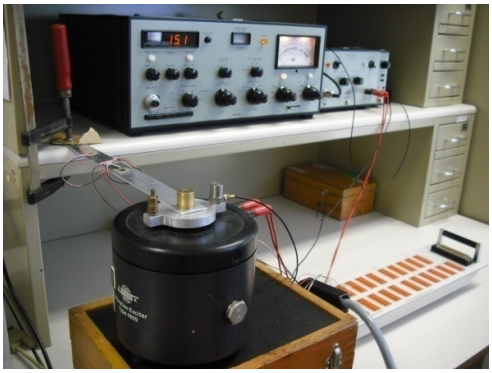


Figura 5. 15 - Montagem Experimental do Ensaio Dinâmico

De modo análogo ao ensaio experimental estático, foram efectuadas as ligações dos extensómetros ao Módulo RHM3209 e este conectado à HBM-UPM60, ficando a configuração da ponte de Wheatstone em ¼ de ponte e da seguinte forma, Figura 5.16.

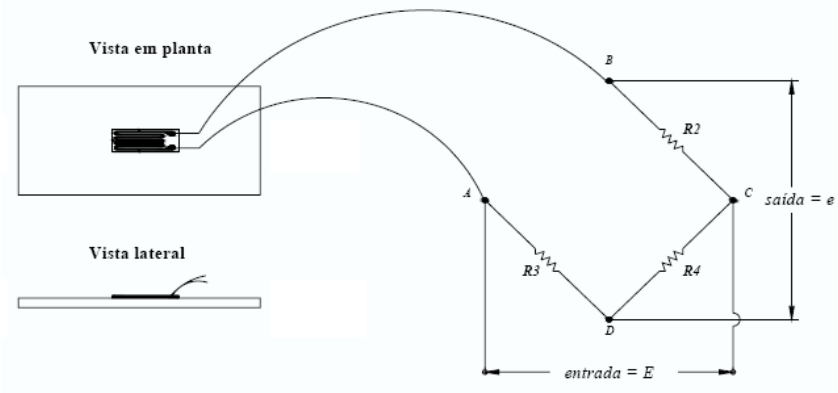


Figura 5. 16 - Ligação dos Extensómetros à Ponte de Wheatstone

Foram efectuadas as mesmas ligações, referidas anteriormente, entre a HBM e o computador através da interface RS232c de modo a registarem-se as medições de extensão através do *Software Catman V1.02* fornecido pela DLQ do AA. O esquema da montagem encontra-se na Figura 5.17.

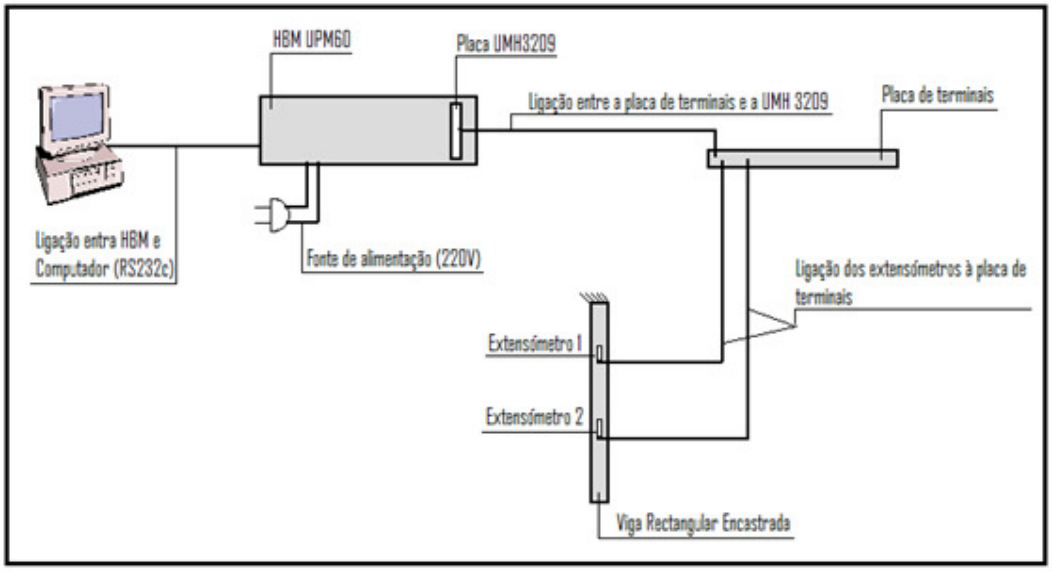


Figura 5. 17 – Esquemas de Ligação da montagem experimental 2

Efectuaram-se vários ensaios, tendo sido estudada a resposta dinâmica dos extensómetros em função da variação da velocidade imposta à extremidade da viga (10 aos 80mm/s) e da frequência de oscilação (dos 10 aos 20Hz).

Os resultados obtidos, em forma de gráfico (Figura 5.18), permitiram visualizar em tempo real a extensão induzida nos dois extensómetros, que corresponde a um espectro de leitura com velocidade de 80mm/s e frequência de oscilação de 10Hz.

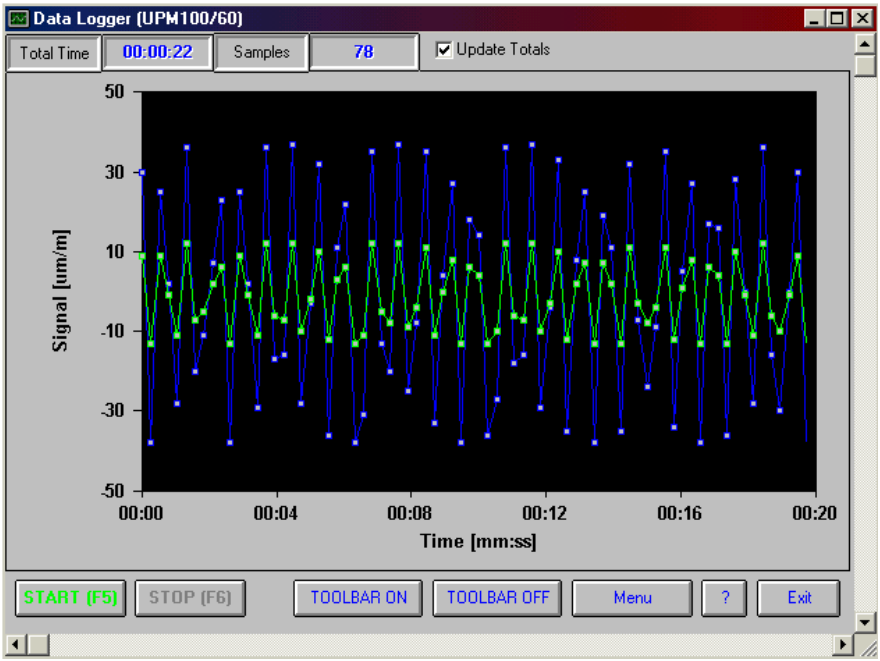


Figura 5. 18 - Exemplo de resultados do ensaio dinâmico

À linha azul corresponde o espectro de leitura do extensómetro 1, colado à distância de 250mm do ponto de aplicação da carga e à linha verde corresponde o espectro de leitura do

extensómetro 2, colocado à distância de 150mm ao ponto de aplicação da carga. De modo a se validarem os resultados obtidos, procedeu-se ao cálculo das extensões por via analítica [5.8], nos locais onde se encontravam os extensómetros, relacionando o deslocamento na extremidade da viga com as velocidades e frequências impostas.

Foi possível relacionar o deslocamento na extremidade da viga, d, com as velocidades, V, e as frequências, F, impostas através da seguinte equação 5.8 [18][31]:

$$d = \frac{27009 \times V}{F} \quad [5.8]$$

onde d corresponde ao deslocamento, pico a pico, em microns, V corresponde à velocidade imposta em mm/s e F à frequência em ciclos por minuto (CPM).

Assim, para uma velocidade de 80mm/s e uma frequência de 10Hz (Figura 5.18) tem-se:

$$d = \frac{27009 \times V}{F} = \frac{27009 \times 80}{10 \times 60} = 3600 \mu m = 3.6 mm$$

Para uma viga encastrada numa extremidade e sujeita à flexão, Figura 5.19, é possível relacionar a flecha máxima, que ocorre na sua extremidade livre, com a força imposta.

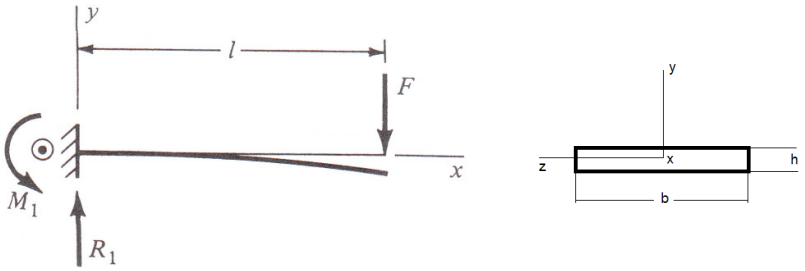


Figura 5. 19 - Viga encastrada numa extremidade e livre na outra.

A equação que relaciona a flecha máxima (deslocamento) com a força imposta, para o caso em estudo é:

$$\delta_{máx} = \frac{D}{2} = \frac{F \times l^3}{3 \times E \times I} \quad [5.9]$$

Onde *F* representa a força imposta em Newton (N), *l* o comprimento da viga em metros (m), *E* o Módulo de Young da viga (liga de alumínio) e *I* o momento de inércia da viga relativo ao eixo z. em m^4 , que é dado por:

$$I_z = \frac{b \times h^3}{12} \quad [m^4] \quad [5.7]$$

Onde b é o comprimento da secção da viga, e h a altura da mesma (Figura 5.19).

[31]Vibration Trainning Quick Reference – Glossary Diagnostic Guide, Useful Charts and Tables , Mobius Institute

Para a viga de alumínio (Figura 5.13) tem-se:

- b=30mm
- h=2mm
- l =305mm
- E=71GPa

Fica então:

$$I_z = \frac{b \times h^3}{12} = \frac{0.03 \times 0.002^3}{12} = 2 \times 10^{-11} m^4$$

e:

$$\frac{D}{2} = 1.8 \times 10^{-3} = \frac{F \times 0.305^3}{3 \times 71 \times 10^9 \times 2 \times 10^{-11}} \Rightarrow F = 0.266N$$

Para o cálculo do valor de tensão induzido num qualquer ponto da viga tem-se:

$$\sigma_{xx} = \frac{M_z}{I_z} \times y \; [MPa] \quad [5.5]$$

onde σ_{xx} é a tensão em MPa, Mz é o momento induzido pela carga P em torno do eixo z, e Iz o momento de inércia relativo ao eixo z, que vêm:

$$M_z = P \times d \; [N.m] \quad [5.6]$$

P é a carga aplicada na extremidade livre da viga e d a distância entre esta e o ponto onde se pretende conhecer a tensão, neste caso no ponto onde se encontram os 2 extensómetros:

- Extensómetro 1: $Mz = P \times d = 0.266 \times 0.250 = 0.0665 \; Nm$
- Extensómetro 2: $Mz = P \times d = 0.266 \times 0.150 = 0.0399 \; Nm$

pelo que:

- Extensómetro 1: $\sigma_{xx} = \frac{0.0665}{2 \times 10^{-11}} \times 0.001 = 3.325 MPa$
- Extensómetro 2: $\sigma_{xx} = \frac{0.0399}{2 \times 10^{-11}} \times 0.001 = 1.995 MPa$

Aplicando a Lei de Hooke que relaciona a extensão e tensão

$$\sigma = \varepsilon \times E \quad [5.4]$$

Tem-se então:

- Extensómetro 1: $\sigma = 3.325 MPa = \varepsilon \times 71 \times 10^9 \Rightarrow \varepsilon = 47.5 \mu e$

- Extensómetro 2: $\sigma = 1.995MPa = \varepsilon \times 71 \times 10^9 \Rightarrow \varepsilon = 28.5\mu e$

Da Figura 5.18 verifica-se que ao extensómetro 1 corresponde uma extensão máxima de 42 $\mu\varepsilon$ enquanto que por via analítica se obteve o valor de 47.5 $\mu\varepsilon$ o que corresponde a uma diferença de 10%.

No Anexo 8 encontram-se os dados referentes aos vários ensaios experimentais realizados, onde se variou a frequência de oscilação, assim como a velocidade da mesma. A Tabela 5.3 apresenta as diferenças entre os resultados analíticos e as medições registadas para o extensómetro 2.

Tabela 5. 3 - Extensão Teórica vs. Extensão Prática

	Frequência								
	10 Hz			15 Hz			20 Hz		
Velocidade	Ext. Teo.	Ext. Exp.	Diferença [%]	Ext. Teo.	Ext. Exp.	Diferença [%]	Ext. Teo.	Ext. Exp.	Diferença [%]
10 mm/s	3,57	4	11	2,38	2,5	5	1,78	2	11
20 mm/s	7,14	8	11	4,76	4,5	5	3,57	3,5	2
40 mm/s	14,3	15	5	9,52	10	5	7,14	8	11
80 mm/s	28,5	32	11	19	21	10	14,3	15	5

Optou-se por não incluir a tabela relativa aos resultados do extensometro 1, pois estes apresentam diferenças na ordem dos 50% entre resultados analíticos e medições, devido presumivelmente a falhas na colagem entre o extensometro e a viga de alumínio.

5.3. Provas de Mar

Uma vez obtidos e validados os resultados dos ensaios experimentais, estáticos e dinâmicos, utilizaram-se os conhecimentos nestes adquiridos para a realização das provas de mar, com o objectivo de se obterem as tensões induzidas devido ao efeito de *Slamming* na Antepara 17, em situação de navegação.

Para tal foi colado um extensómetro uniaxial na chapa da Antepara 17, num local escolhido tanto pela observação da distribuição de tensões através do MEF, como pela disponibilidade de espaço a bordo da embarcação (Figura 5.20). O local escolhido para a colagem do extensómetro foi a meio da Antepara (próximo do reforço principal com altura máxima) e o mais próximo possível da base desta, uma vez as tensões máximas devido ao carregamento no plano (*Slamming*) foram aí obtidas (Capítulo 4)

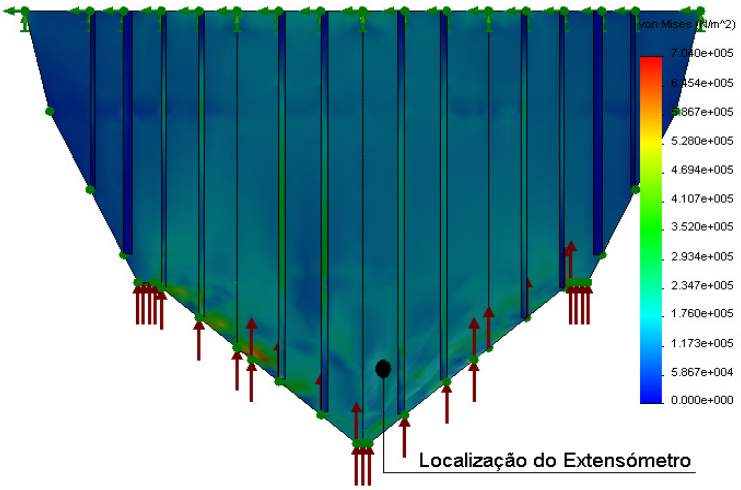


Figura 5. 20 - Localização do Extensómetro na Antepara 17

Repetiram-se os processos referidos nos Subcapítulos anteriores, referentes a tratamentos de superfície e, colagem do extensómetro na Antepara 17, a qual foi feita através de uma cola cerâmica, da marca HBM, com temperatura de cura à temperatura ambiente (Figura 5.21). As etapas do processo de colagem do extensómetro encontram-se referidas em maior detalhe no Anexo 9.

Figura 5. 21 - Cola à Base de Cermica Usada para a Colagem do Extensómetro na Antepara 17

O extensómetro foi alinhado com a sua grelha na vertical, de modo a obterem-se as tensões devido ao *Slamming* (carregamento no plano vertical) e nos seus terminais foram soldados condutores eléctricos, sendo que o resultado final se encontra na Figura 5.21.

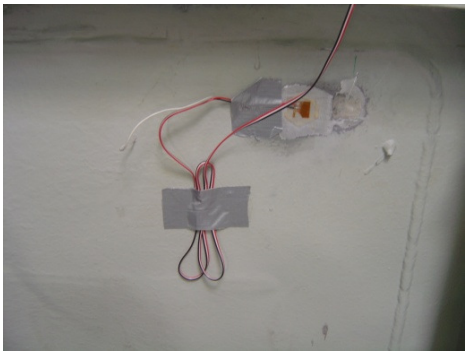


Figura 5. 22 - Extensómetro na Antepara 17

Foi instalado a bordo, conforme a Figura 5.23, todo o equipamento necessário às medições, que consistiu na ponte de medição HBM UPM60, placa de terminais e computador portátil com o *Software* Catman V6.01, uma vez que não foi possível a instalação do Catman V1.02 num computador portátil devido a incompatibilidades de *Software*.

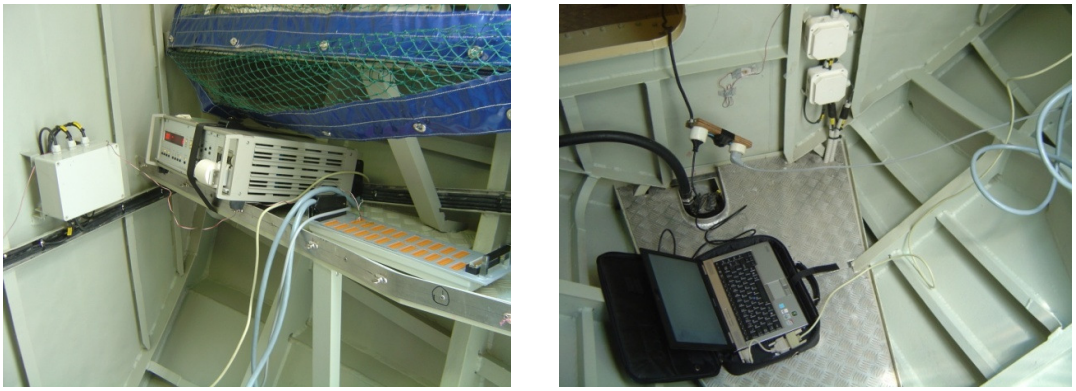


Figura 5. 23 - Equipamento instalado a bordo

Efectuadas e verificadas as ligações entre os vários componentes, deu-se lugar às provas de mar, duas no total, que se realizaram no Mar da Palha (Estuário do Tejo). Em ambas as provas a velocidade da embarcação foi de 24 nós, podendo-se considerar constante, a altura significativa das ondas foi de aproximadamente 30cm (Figura 5.24).

Figura 5. 24 - Provas de Mar (imagem retirada em navegação)

Os dados obtidos foram consistentes entre as duas provas de mar realizadas (Figuras 5.25 e 5.26), as quais tiveram uma duração de aproximadamente 25 minutos e uma frequência de aquisição de dados de 5Hz. Com os dados obtidos foram efectuados dois gráficos extensão vs. Tempo (Figuras 5.25 e 5.26).

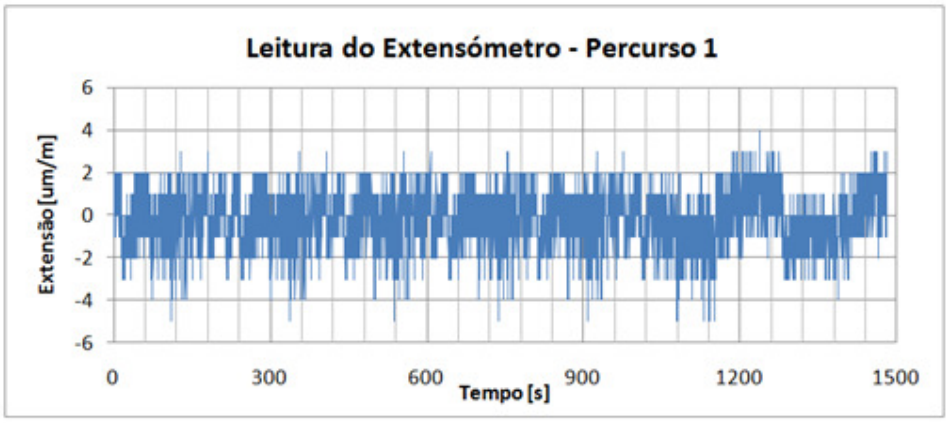


Figura 5. 25 – Gráfico de Extensão-Tempo registado no Percurso 1

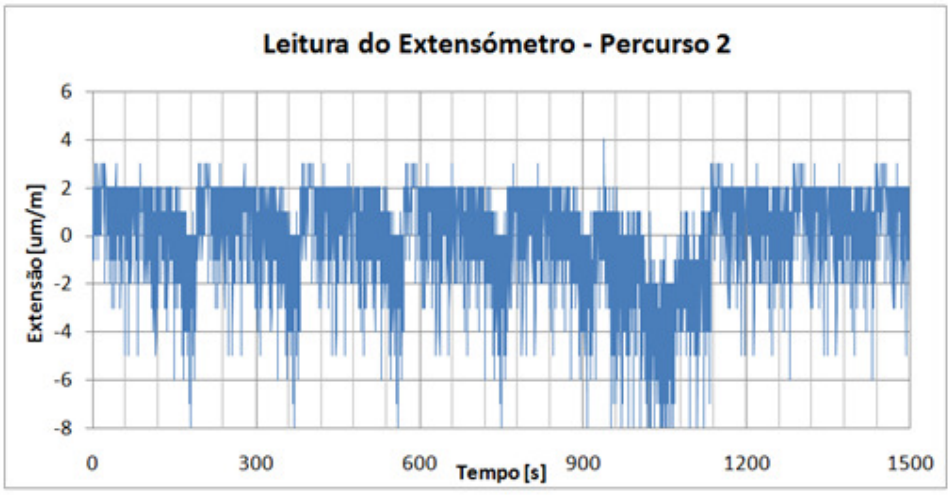


Figura 5. 26 – Gráfico de Extensão-Tempo registado no Percurso 2

A extensão média registada foi de -5µm/m, no percurso 2, o que corresponde a uma compressão induzida na Antepara 17 devido ao efeito de *Slamming* que, relacionando com a Lei de Hooke, corresponde a uma tensão induzida de:

- $\sigma = \varepsilon \times E = 5 \times 10^{-6} \times 71 \times 10^{9}$
  $\sigma = 0.355 MPa$

O valor de tensão de Von Mises na zona de localização do extensómetro, que se obteve através do MEF para a Antepara 17 quando simulado o efeito de *Slamming* (carregamento no plano de 150kPa) foi de 0.15MPa, 57% inferior ao valor obtido experimentalmente. As possíveis causas para a diferença registada poderão ser:

- A velocidade de aplicação da carga real, por implusos, é diferente da carga estática simulada pelo MEF;
- As condições de fronteira consideradas no modelo numérico não correspondem exactamente às existentes no navio;
- A geometria da antepara real não é exactamente igual à modelada, uma vez que, próximo da zona onde foi colocado o extensómetro existe agora uma porta de passagem entre compartimentos adjacentes;
- Poderão ainda existir erros associados à colagem e leitura dos valores provenientes do extensómetro aplicado.

6. Fadiga

O presente capítulo tem como objectivo fazer a estimativa de vida à fadiga da Antepara 17, tendo em consideração o espectro de carga real obtido. Descrevem-se, em seguida, e de forma sucinta, alguns conceitos principais sobre o processo de fadiga.

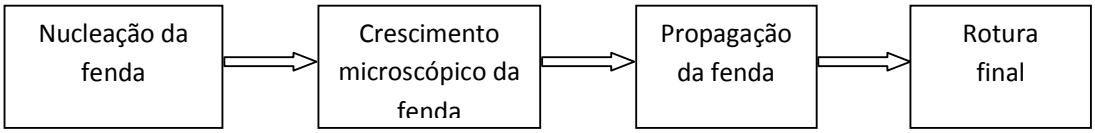
6.1. Conceitos sobre o Processo de Fadiga [19] [32]

A fadiga de um metal define-se como um fenómeno de enfraquecimento progressivo, quando este é submetido a cargas dinâmicas. Sabe-se que a fadiga é a causa de 80 a 90% de todas as ruínas de peças ou estruturas submetidas a esforços mecânicos que trabalham à temperatura ambiente.

Fadiga é um processo de alteração estrutural permanente, *progressivo* e *localizado* que ocorre num material, num ponto ou em vários pontos, e que pode culminar em *fendas,* ou numa *fractura* completa após um número suficiente de variações de carga.

No parágrafo anterior, as palavras-chave do processo de fadiga encontram-se evidenciadas em itálico. Assim, a palavra "progressivo" indica que o processo de fadiga se verificou durante um certo período de tempo ou uso. Uma rotura por fadiga é muitas vezes súbita e ocorre sem dar sinal porque a fenda não é visível ou está inacessível. Contudo, os mecanismos envolvidos na rotura podem ter estado a funcionar desde o inicio de funcionamento da peça ou estrutura. A palavra "localizado", significa que o processo de fadiga se dá em pequenas áreas em vez de ser em toda a peça ou estrutura. Estas áreas locais podem estar sujeitas a tensões ou extensões elevadas devido a transferências externas de carga, variações bruscas de geometria (concentração de tensões), tensões residuais, diferenciais de temperatura e imperfeições do material. As palavras "fendas" e "fracturas" significam que, numa zona crítica do material, uma fenda cresceu até um ponto em que o material restante na secção transversal não foi capaz de suportar as tensões aplicadas, dando-se a fractura súbita.

A rotura por fadiga é provocada pela nucleação e propagação lenta de fendas e pode considerar-se dividido em quatro fases a seguir indicadas.



Para mais informações sobre os temas abordados no presente capítulo aconselham-se as referências bibliográficas [3] e [19].

[32] C. Moura Branco, *Mecânica dos Materiais,* 3ª Edição

6.1.1. Solicitações de Fadiga

Conforme o valor médio da solicitação a que uma peça ou estrutura é submetida, esta é designada de alternada pura, alternada, repetida/pulsante ou ondulada, como ilustrado na Figura 6.1.

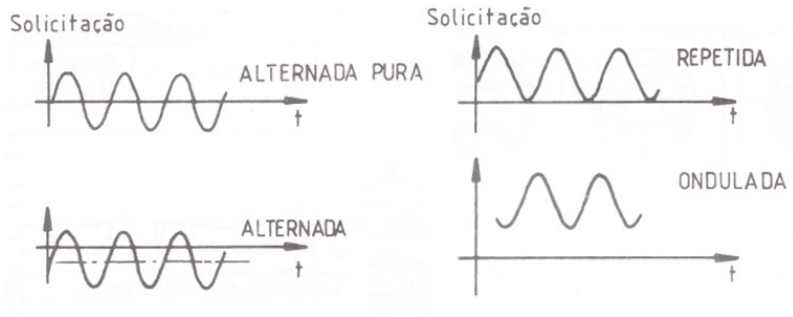


Figura 6. 1 - Tipo de Solicitações à Fadiga[3][33]

O ciclo de tensão representa a variação da tensão aplicada com o tempo ou o número de ciclos de aplicação da força. Alguns conceitos podem ser definidos para caracterizar o ciclo de tensão:

- Tensão média: $\sigma_m = \dfrac{\sigma_{máx} + \sigma_{\min}}{2}$ [6.1]
- Amplitude de tensão ou tensão alternada: $\sigma_a = \dfrac{\sigma_{máx} - \sigma_{\min}}{2}$ [6.2]
- Razão de tensões: $R = \dfrac{\sigma_{\min}}{\sigma_{máx}}$ [6.3]

A simbologia utilizada está representada na Figura 6.2.

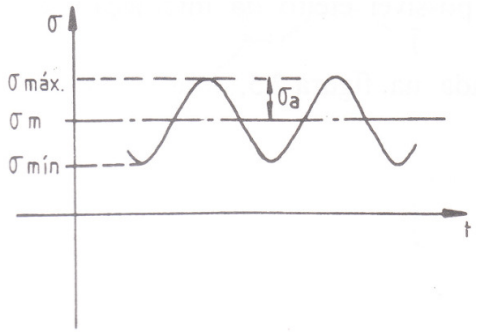


Figura 6. 2 - Simbologia de Ciclos de Tensão

[33] Branco, C. Moura; Fernandes, A. Augusto; Castro, Paulo, Fadiga de Estruturas Soldadas, 2ª Edição, 1999

Em casos práticos, o espectro de carga pode ser distinto de qualquer destes casos, e apresentar distribuições porventura aleatórias. Estes casos podem ser tratados agrupando as solicitações semelhantes em blocos, desde que seja utilizado um Método de Contagem de Ciclos. Este procedimento facilita ou torna possível o estudo de casos práticos, como se mostrará nos Subcapítulos 6.1.5 e 6.1.6.

6.1.2. Curvas S-N

A vida à fadiga de uma peça ou estrutura é função do número de ciclos necessários para causar rotura para um determinado tipo de solicitação.

Os resultados de ensaios de fadiga em provetes são geralmente apresentados numa curva tensão-número de ciclos, ou simplesmente curva S-N, curva básica ou intrínseca de fadiga do material, também conhecida por Curva de Wohler. O "S" vem da palavra inglesa *stress*, que quer dizer tensão, e N representa o número de ciclos. Supondo que, para uma certa solicitação S1, o corpo de prova entre em rotura para um certo número de ciclos N1, e para uma solicitação S2 entre em rotura para um certo número de ciclos N2, e assim por diante, pode-se construir o diagrama S-N, com a tensão no eixo das ordenadas e o número de ciclos no eixo das abcissas como ilustrado na Figura 6.3.

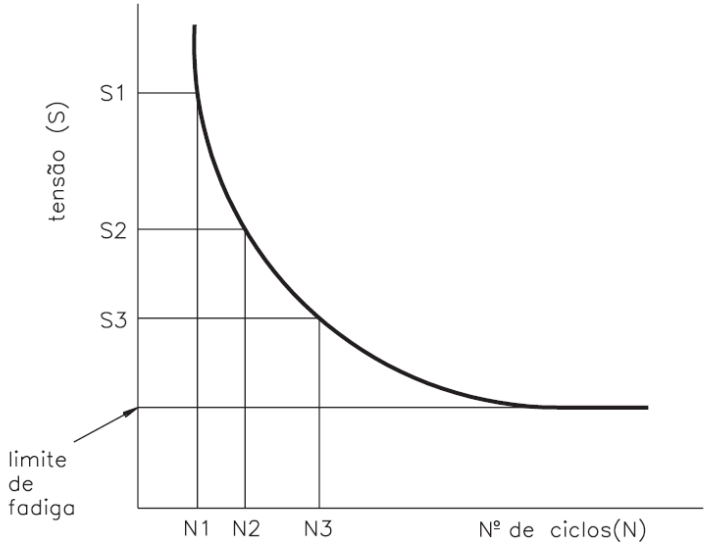


Figura 6. 3 - Curva S-N

Observando a curva, nota-se que, à medida que se diminui a tensão aplicada, o corpo de prova resiste a um maior número de ciclos. Nota-se, também, que diminuindo a tensão a partir de um certo nível, a curva tende para uma assímptota horizontal e o número de ciclos para a ruptura por fadiga do corpo de prova torna-se praticamente infinito. Esta tensão mínima, que não provoca a fractura por fadiga, chama-se tensão limite de fadiga, ou resistência à fadiga, do material considerado. Mas, para a maioria dos materiais, especialmente os metais não ferrosos como o alumínio, a curva obtida no diagrama S-N é sempre decrescente, não existindo por isso um valor de tensão limite de fadiga.

6.1.3. Efeito da Tensão Média, Critérios de Dimensionamento

As curvas S-N (Figura 6.3) alteram-se quando a tensão média do ciclo deixa de ser nula, caso que ocorre nos ciclos de tensão repetidos ou pulsantes. Esta situação é muito frequente na prática. Quando se aumenta a tensão média no ciclo de carregamento, o limite de fadiga sofre uma redução sensível, que pode ser estimada com base em critérios como os definidos por Godman, Soderberg ou Gerber.

A Figura 6.4 representa esquematicamente os 3 critérios e constitui uma forma de verificar se um determinado ciclo de tensões, definido por pares de valores (σa, σm) ou (R, σa) pode provocar, ou não, rotura no material. Ao conjunto de pontos no interior do domínio definido pelos eixos σa , σm e a linha do critério correspondem situações em que não ocorre rotura por fadiga. As equações que definem os três critérios representados são, respectivamente:

- Recta de Soderberg $\sigma_a = \sigma_{f0}\left(1-\frac{\sigma_m}{\sigma_c}\right)$ [6.4]
- Recta de Godman $\sigma_a = \sigma_{f0}\left(1-\frac{\sigma_m}{\sigma_R}\right)$ [6.5]
- Parábola de Gerber $\sigma_a = \sigma_{f0}\left(1-\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_R}\right)^2\right)$ [6.6]

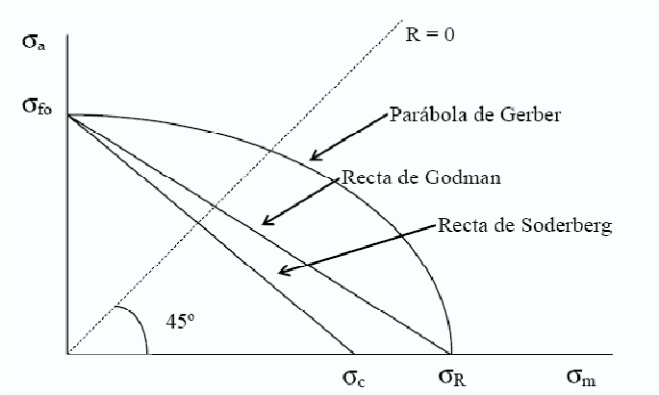


Figura 6. 4 - Critérios de Dimensionamento

Onde:

- σ_{f0} - Tensão limite de fadiga para uma tensão média igual a zero;
- σ_c - Tensão de cedência;
- σ_R - Tensão de rotura.

6.1.4. Estabelecimento da Tensão Admissível de Fadiga

Normalmente a tensão admissível de fadiga é inferior à tensão limite de fadiga determinada a partir da curva S-N, pois esta última refere-se, normalmente, a ensaios feitos com condições específicas, como sejam: pequenos provetes polidos, condições de laboratório, etc.. Contudo, pode-se estimar a tensão limite de fadiga admissível, afectando a curva S-N de um conjunto de factores de redução, que contabilizam o efeito dos principais parâmetros que afectam o comportamento à fadiga.
Desta forma tem-se:

$$\sigma_f = K \times \sigma_{f0} \qquad [6.7]$$

Onde:

- σ_f - Tensão limite de fadiga da peça real;
- K - Factor de correcção.
- σ_{f0} - Tensão limite de fadiga de ensaio;

Em que:

$$\mathrm{K} = \mathrm{k1} \times \mathrm{k2} \times \mathrm{k3} \times \mathrm{k4} \times \mathrm{k5} \times \mathrm{Kf}$$

Sendo:

- k1 - coeficiente representativo do efeito do acabamento superficial;
- k2 - coeficiente representativo do factor dimensão;
- k3 - coeficiente representativo do factor de carga;
- k4 - coeficiente representativo do factor de tipo de solicitação;
- k5 - coeficiente representativo do efeito da temperatura;
- Kf - representa o factor dinâmico de concentração de tensões que pode ser calculado através do índice de sensibilidade ao entalhe, q, cuja expressão é:

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1} \qquad [6.8]$$

Sendo que:

- q = 0 para materiais insensíveis ao entalhe $\Rightarrow K_f = 1$;
- q = 1 para materiais totalmente sensíveis ao entalhe $\Rightarrow K_f = K_t$;
- Kt - representa o factor de concentração de tensões estático.

6.1.5. Dano Acumulado, Vida à Fadiga, Lei de Miner

Quando uma peça ou estrutura é submetida a um número de ciclos de solicitação inferior ao número necessário para causar a rotura para essa solicitação, é intuitivo que embora não fracture, sofra deterioração da sua resistência. Pode pôr-se a questão de saber qual o número de ciclos de uma outra solicitação a que a peça ou estrutura poderia ainda resistir. Este número é certamente menor que a vida à fadiga para essa solicitação, pois a peça ou estrutura já se encontra danificada.

Entre outros, o processo mais simples para avaliar este efeito deve-se a Miner, e consiste em admitir que o dano pode ser expresso em termos do quociente entre o número de ciclos aplicado (n) e o número de ciclos para causar rotura para essa solicitação (N). Miner postulou em seguida que a rotura de fadiga ocorre quando o somatório dos incrementos de dano é igual à unidade [eq. 6.9].

$$\sum_i \left(\frac{n}{N}\right)_i \leq 1 \qquad [6.9]$$

Onde n é o número de ciclos aplicado, e N é o número de ciclos para causar rotura no caso da mesma solicitação.

Segundo Miner, esta "Lei" aplica-se com maior rigor ao alumínio do que aos aços, e tem um grande sucesso no caso de espectros de carga aleatórios.[3][34] Eventualmente, porém, o segundo membro da equação 6.9 pode ser menor que a unidade, e, para melhor precisão e segurança, será desejável fazer os ensaios laboratoriais apropriados.

Quando a situação em análise apresenta vários níveis de combinação entre tensão média e tensão alternada, além de apresentar diferentes frequências, como na Figura 6.5, a Lei de Miner pode ser apresentada conforme a equação 6.10.

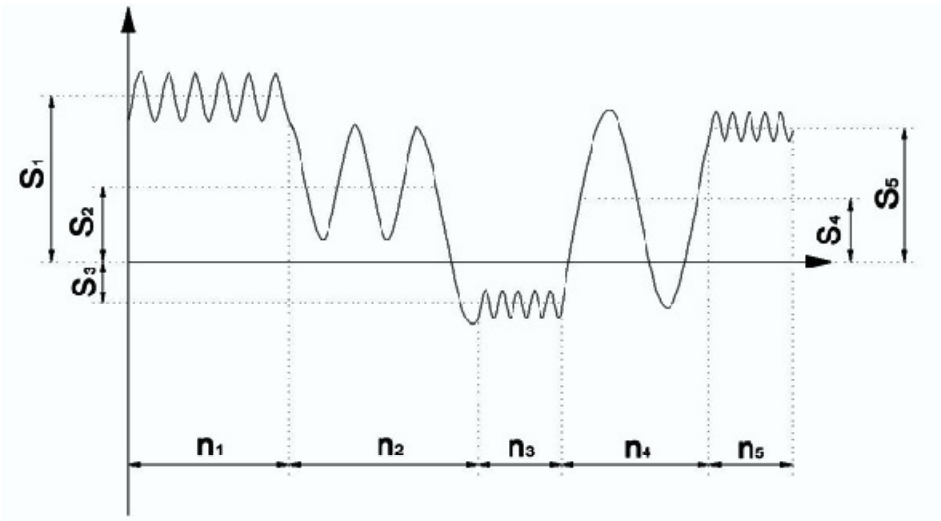


Figura 6. 5 - Combinação de Espectros de Carga

$$\sum_{i=1}^{N_{tot}} \frac{n_i}{N_i} \leq 1 \Leftrightarrow \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \frac{n_4}{N_4} + \frac{n_5}{N_5} \leq 1 \qquad [6.10]$$

[34] Branco, C. Moura; Fernandes, A. Augusto; Castro, Paulo, Fadiga de Estruturas Soldadas, 2ª Edição, 1999

6.1.6. Espectros de carga reais, Método de *rainflow*[35] [3]

A aplicação de regras de danos acumulados do tipo da de Miner pressupõe que um espectro real de tensões seja substituído por uma série de espectros parciais sinusoidais de amplitude constante (Figura 6.5), ou seja blocos de ciclos sinusoidais, sendo que a amplitude da tensão sinusoidal é constante no interior do bloco mas varia de um bloco para o outro.

Um espectro real de carga ou tensão pode apresentar-se sob diversas formas e graus de complexidade variável como ilustrado na Figura 6.6.

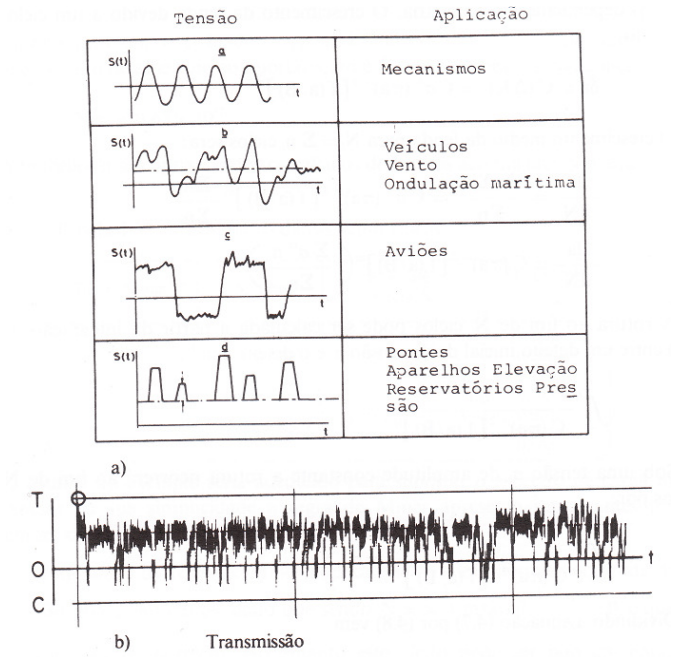


Figura 6. 6 - Espectros de Cargas Reais

Os espectros de carga a que um componente estrutural pode estar sujeito podem ser do tipo de carga constante, ou ser uma sequência de amplitudes de carga variável com o tempo, como é o caso da Antepara 17 em estudo.

Face à complexidade que os espectros de carga podem tomar, torna-se necessário a utilização de Métodos de contagem de ciclos. Vários Métodos têm sido propostos e é aqui analisado o Método de *rainflow,* ou gota de água, pois foi este o Método utilizado na contagem de ciclos do espectro de carga obtido para a Antepara 17.

O Método *rainflow*, recebe o seu nome da analogia com a queda de uma gota de água ao longo de um telhado de pagode, e determina o número n e a grandeza S das gamas de tensão de um espectro real. Na Figura 6.7 é ilustrado o modo como é aplicado este Método ao estudo de espectros reais.

[35] Branco, C. Moura; Fernandes, A. Augusto; Castro, Paulo, *Fadiga de Estruturas Soldadas,* 2ª Edição, 1999

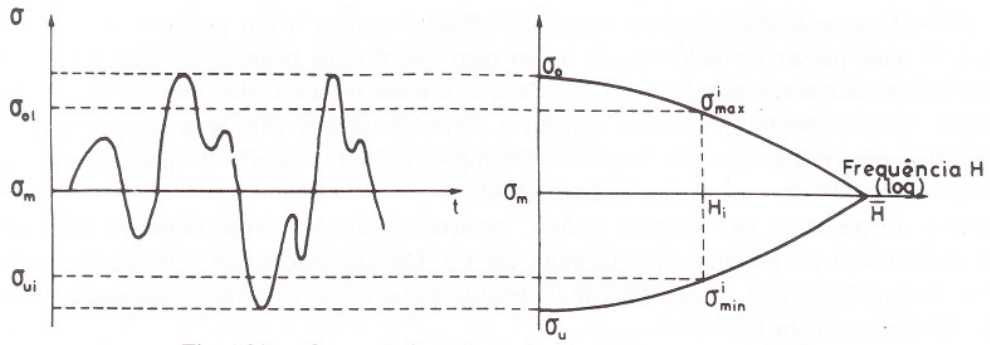
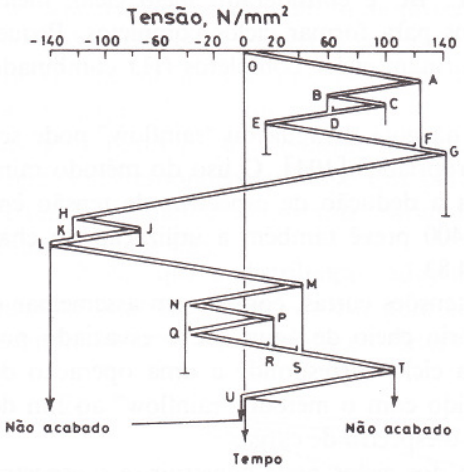


Fig. 4.81 — Curva de frequência da amplitude de tensão [99].



Gama Tensão N/mm²	Meios Ciclos (+)	Meios Ciclos (−)	Total
20			0
40	BC, HJ	CD, JK	2
60	QR	PQ	1
80	NS	MN	1
100	EF	AE	1
120			0
140	OG		1/2
160			0
180			0
200			0
220			0
240			0
260			0
280			0

Figura 6. 7 - Aplicação do Método de *Rainflow*

De modo a visualizar mais facilmente o Método, o registo é colocado na posição vertical, substituindo os picos e vales do espectro por um espectro com a forma em dentes de serra.

Os picos são numerados com números pares e os vales com números ímpares. A água pode escorrer tanto da direita para a esquerda como da esquerda para a direita. O início e o fim de cada caminho de escoamento definem as extremidades de metade de um ciclo, podendo o caminho iniciar-se tanto nos picos como nos vales. Para ilustrar a aplicação do Método será feita referência à Figura 6.7. A gota inicia o seu movimento no ponto 0, percorrendo o primeiro telhado até atingir um pico ou um vale; nesse momento a gota cai verticalmente até atingir outro telhado e o processo é repetido até que uma das duas condições seguintes é satisfeita:

- Uma gota movendo-se ao longo de um telhado pára se se cruzar com uma gota que caia de um telhado acima; por exemplo, o percurso CD intersecta o percurso da gota que cai do pico B e o percurso EF intersecta o percurso da gota que cai de AF;
- Uma gota que cai da ponta de um telhado termina o seu percurso se a gota ao cair passar do lado oposto a um pico que é mais positivo do que o inicio do percurso em estudo, ou um vale que é mais negativo do que o inicio do percurso. Neste contexto a origem é considerada um vale se a tensão se desenvolve numa direcção positiva. Exemplos de gotas caindo do pico C ou de um vale E são mostrados na Figura 6.2. O

percurso BC termutiliina após C porque o vale E é mais negativo que B. De modo idêntico o percurso termina em E porque o pico G é mais positivo que o pico A;

- Um percurso não é iniciado antes de o anterior ter terminado.

Cada percurso completo, OAFG,ABDE,BC, é considerado meio ciclo; meios ciclos com gama de tensão igual são combinados para formar ciclos completos. Pequenas interrupções do percurso, tais como HJK, formam ciclos completos (HJ combinando com JK).

A contagem de ciclos usando o Método de *rainflow* pode ser feita em computador recorrendo a algoritmos apropriados, como é o caso dos existentes no *Software* CosmosWorks, que se utilizará na estimativa da vida à fadiga da Antepara 17 a partir de um espectro real (subcapítulo 6.3).

6.2. Experiências de Validação

Uma vez que a estimativa de vida à fadiga da Antepara 17 será efectuada com o auxílio do *Software* de MEF SolidWorks/CosmosWorks, realizou-se um exemplo de cálculo de vida à fadiga utilizando o *Software* indicado de modo a validar a sua utilização e funcionamento.

Começou por se modelar um veio entalhado com uma concordância suave, como ilustrado na Figura 6.8. Efectuou-se um refinamento de malha na zona do entalhe, zona concentração de tensões, para uma melhor convergência de posteriores resultados. O veio tem 100mm de diâmetro maior (D) e 50mm no diâmetro menor (d). O raio de concordância (r) definido foi de 10mm.

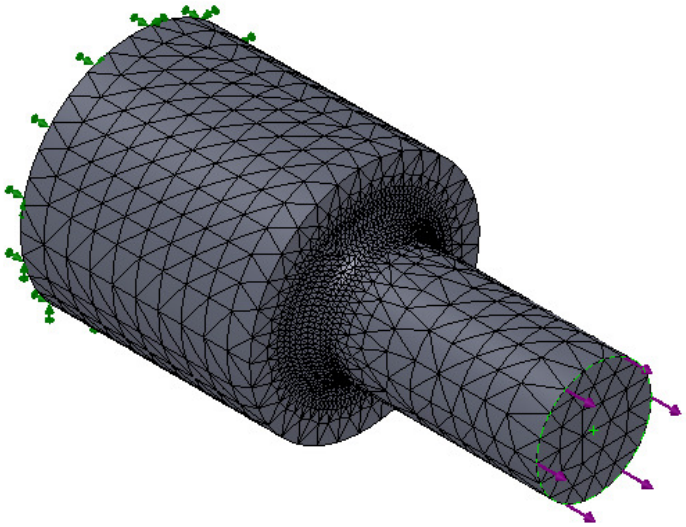


Figura 6. 8 - Veio Modelado com Malha de Elementos

Analisando a Figura 6.9, retirada da referência bibliográfica [3], o factor de concentração de tensões que se obtém para o veio modelado é de Kt=1.6., uma vez que:

$$\frac{D}{d} = \frac{100mm}{50mm} = 2$$

$$\frac{r}{d} = \frac{10mm}{50mm} = 0.2$$

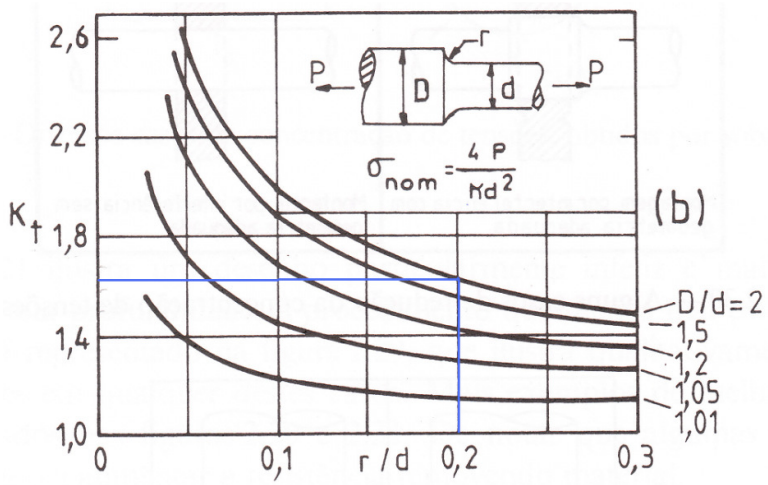


Figura 6. 9 - Factor de Concentração de Tensões

Admitiu-se que o veio foi submetido 10000 a ciclos de tensões repetidas de tracção ($\sigma_{\min} = 0 \Rightarrow R = 0$) com uma carga de 300kN como ilustrado na Figura 6.10.

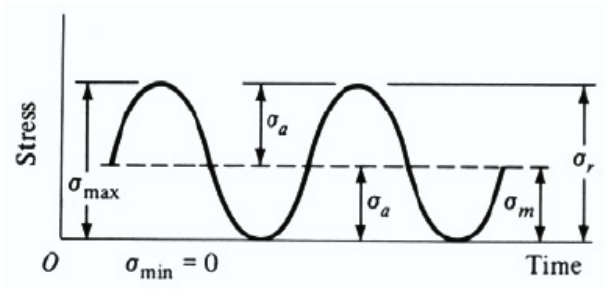


Figura 6. 10 - Ciclo de Tracção Repetida (R=0)

Para o veio modelado, sabe-se que a tensão nominal estática induzida pela carga de 300kN no veio é dada por:

$$\sigma_{nom} = \frac{4P}{\pi d^2} \quad [6.11]$$

Onde:

- P – Corresponde ao valor de carregamento (300kN);
- d – Corresponde ao menor diâmetro do veio (50mm).

Fica então:

$$\sigma_{nom} = \frac{4 \times 300 \times 10^3}{\pi \times (50 \times 10^{-3})^2} = 153MPa$$

Uma vez que o factor de concentração de tensões estático (Kt) é 1.6 a tensão máxima é dada por:

$$\sigma_{máx} = \sigma_{nom} \times K_t = 153MPa \times 1.6 = 245MPa$$

A tensão nominal estática obtida através do *Software* de MEF (SolidWorks/CosmosWorks) foi de 152MPa, e a tensão máxima de 243MPa como ilustrado na Figura 6.11, o que representa diferenças relativamente ao Método analítico inferiores a 1%.

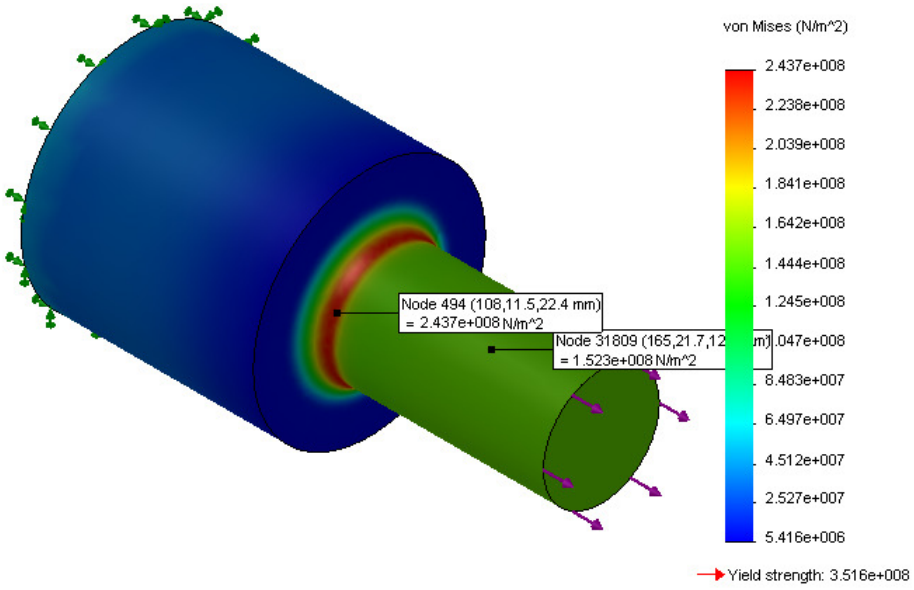


Figura 6. 11 - Tensões Estáticas Induzidas no Veio

Para este tipo de ensaio, e dado que R=0 (tensão repetida) a tensão alternada é igual à tensão média, que, por sua vez, é metade da tensão máxima, ficando:

$$\sigma_a = \sigma_m = \frac{\sigma_{máx}}{2} = \frac{245MPa}{2} = 122MPa$$

Ao modelo efectuado fizeram-se corresponder dois materiais, aço e alumínio. Para cada ensaio realizado foi introduzido no *Software* uma curva S-N respectivamente característica de um aço e de um alumínio (subcapítulos 6.2.1 e 6.2.2).

6.2.1. Ensaio Correspondente ao Veio em Aço

Para o ensaio correspondente ao veio constituído de aço foi introduzida uma curva S-N característica de um aço comum AISI 1020 como ilustrado na Figura 6.12.

Em que:

- Tensão de Rotura, σ rot = 420MPa
- Tensão de Cedência, σ ced = 351MPa
- Tensão limite de fadiga, σ_{f0} = 200MPa

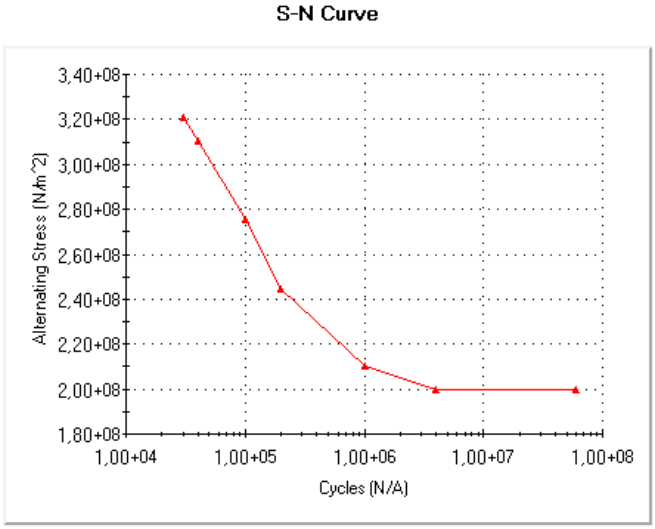


Figura 6. 12 - Curva S-N de Aço AISI1020

Os factores de redução para a tensão admissível de fadiga (Subcapítulo 6.1.4) considerados foram:

- k1 = 0.8 (coeficiente representativo do efeito de acabamento superficial maquinado, Figura 6.13);

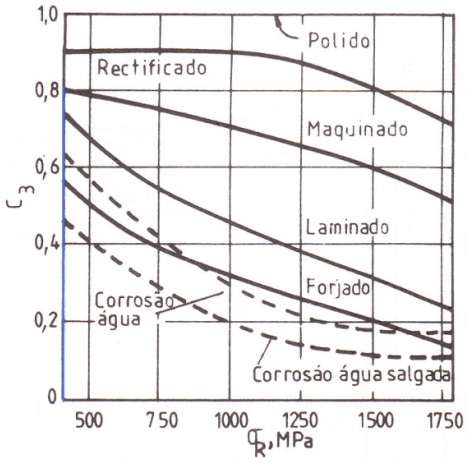


Figura 6. 13 - Coeficiente de Acabamento Superficial

- k2 = 1 - coeficiente representativo do factor tamanho;
- k3 = 0.85 - coeficiente representativo do factor de carga axial;
- k4 = 0.5 - coeficiente representativo para tipo de solicitação de tracção;
- K5 = 1 - coeficiente representativo do efeito da temperatura;
- Kf = 1.6 - representa o factor dinâmico de concentração de tensões que pode ser calculado através do índice de sensibilidade ao entalhe, q, cuja expressão é:

$$k_f = 1 + q(k_t + 1)$$

Em que q representa a sensibilidade ao entalhe = 1 (plena sensibilidade)

Ficando:

$$\mathrm{K} = \mathrm{k1} \times \mathrm{k2} \times \mathrm{k3} \times \mathrm{k4} \times \mathrm{k5} \times \mathrm{Kf} \Leftrightarrow$$
$$\mathrm{K} = 0.8 \times 1 \times 0.85 \times 0.5 \times 1 \times 1.6 = 0.56$$

O valor de K=0.56 é multiplicado pela tensão limite de fadiga do ensaio na curva característica S-N o que produz uma redução de 56% no número de ciclos necessários para causar rotura para um determinado valor de tensão, como ilustrado na Figura 6.14. A tensão limite de fadiga corrigida σ_f é reduzida de 200MPa para 112MPa.

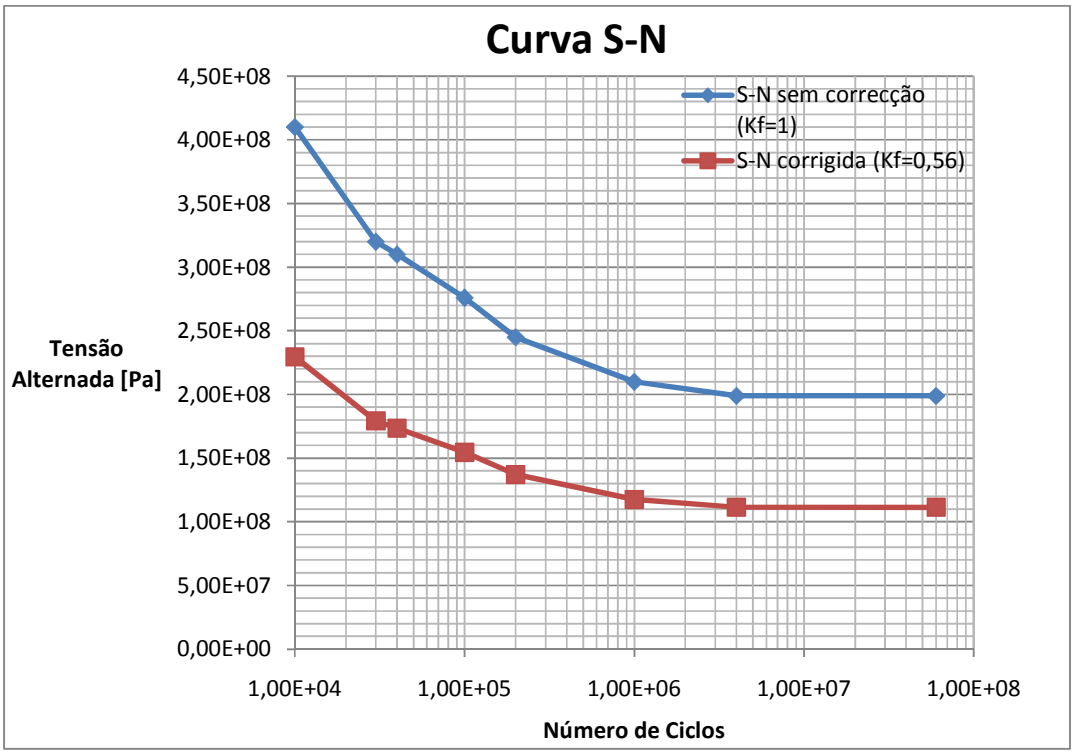


Figura 6. 14 - Correcção da Curva S-N (Aço AISI 1020)

O critério de dimensionamento considerado foi o critério mais conservativo, de Soderberg (Subcapítulo 6.1.3).

A tensão alternada corrigida pelo critério de Soderberg vem na seguinte forma:

$$\sigma_{alternada\ corrigida} = \frac{\sigma_m}{\left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_c}\right)} \Leftrightarrow \frac{122MPa}{\left(1 - \frac{122MPa}{351MPa}\right)} = 188MPa$$

Relacionando a tensão alternada corrigida com o número de ciclos impostos, através da curva S-N característica pode-se obter o dano induzido e a vida à fadiga em termos de números de ciclos, como ilustrado na Figura 6.15.

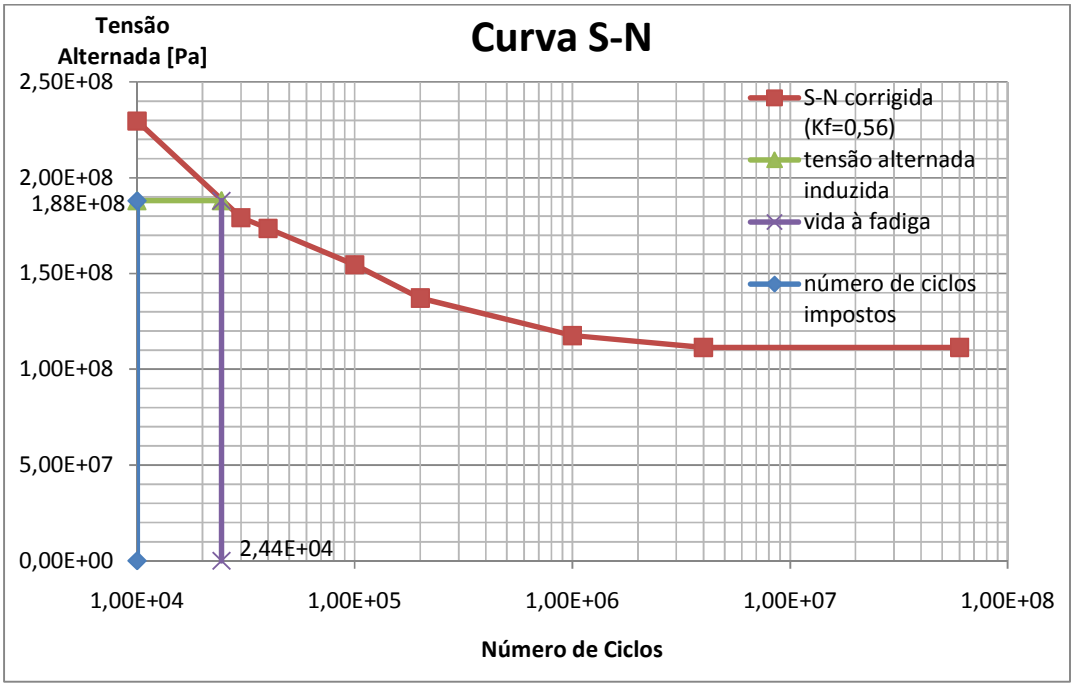


Figura 6. 15 - Obtenção da Vida à Fadiga Através da Curva S-N (Aço AISI 1020)

A vida à fadiga obtida foi de 24400 ciclos e o dano induzido no veio, calculado através da Lei de Miner foi o seguinte:

$$\frac{número\ de\ ciclos\ impostos\ (n)}{vida\ à\ fadiga\ (N)} = \frac{10000}{24400} = 0.409 \cong 41\%$$

Os resultados obtidos através do *Software* encontram-se nas Figuras 6.16 e 6.17, que correspondem a dano acumulado e vida à fadiga em termos de número de ciclos respectivamente.

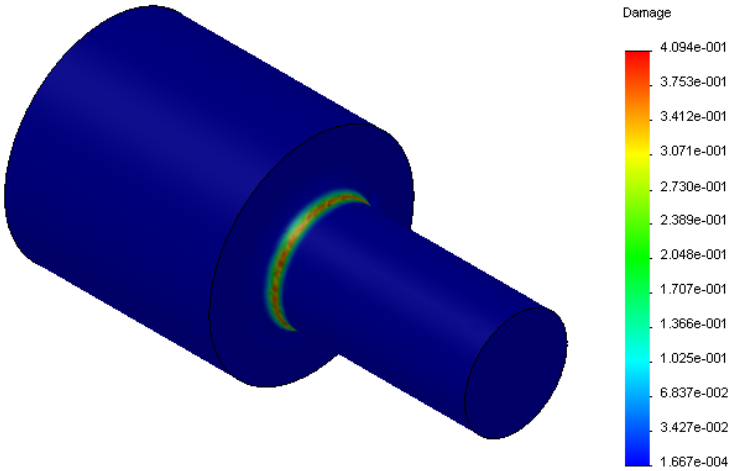


Figura 6. 16 - Dano Acumulado no Veio (Aço AISI 1020) Obtido Através do *Software*

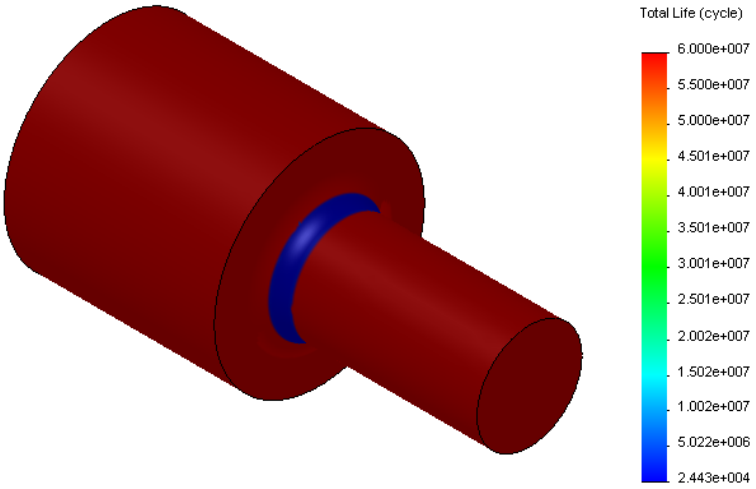


Figura 6. 17 - Vida à Fadiga do Veio Obtido Através do Software

Verifica-se que os valores de dano induzido no veio e a vida à fadiga obtidos através do *Software* SolidWorks/CosmosWorks foram os mesmos obtidos por via analítica com diferenças inferiores a 1%. Pelo que, para este ensaio, ficou validado o uso do *Software* na estimativa de vida à fadiga de componentes.

6.2.2. Teste Correspondente ao Veio em Alumínio

De modo análogo ao teste anterior, fez-se corresponder uma liga de alumínio ao veio modelado. A liga de alumínio simulada foi a liga 2024-T4 retirada da referência bibliográfica [3], como ilustrado na Figura 6.18.

Em que:

- Tensão de Rotura, σ rot = 470MPa
- Tensão de Cedência, σ ced = 325MPa

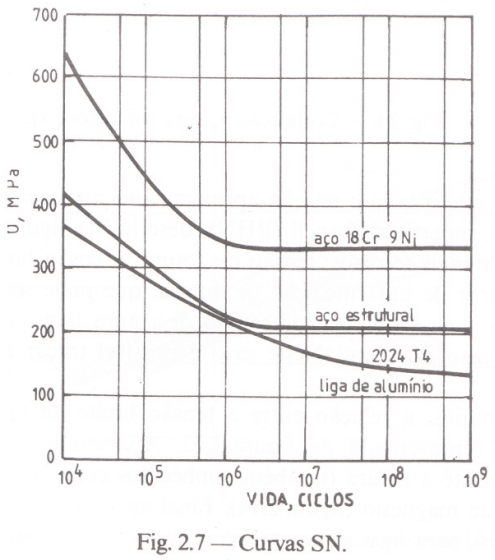


Figura 6. 18 - Curvas S-N Retirada da Referência Bibliográfica [3]

Os factores de redução para a tensão admissível de fadiga (Subcapítulo 6.1.4) considerados foram os mesmos do teste anterior, pelo que:

$$K = k1 \times k2 \times k3 \times k4 \times k5 \times Kf \Leftrightarrow$$
$$K = 0.8 \times 1 \times 0.85 \times 0.5 \times 1 \times 1.6 = 0.56$$

Do mesmo modo, o valor de 0.56 é multiplicado pela tensão limite de fadiga do ensaio na curva característica S-N o que produz uma redução de 56% no número de ciclos necessários para causar rotura para um determinado valor de tensão, como ilustrado na Figura 6.19.

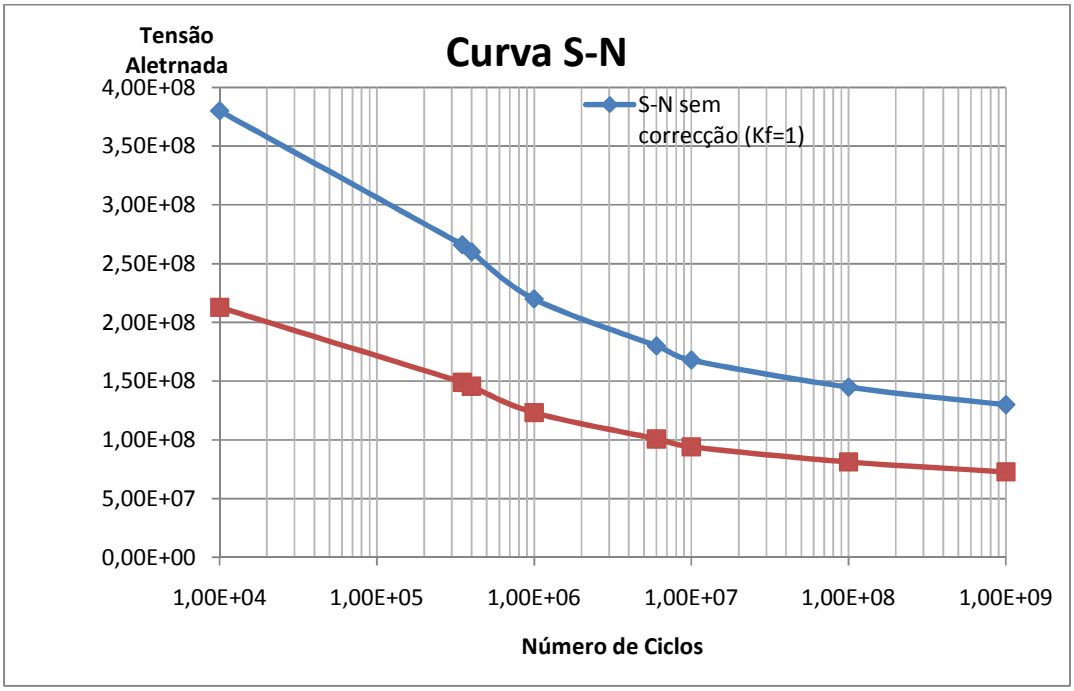


Figura 6. 19 - Correcção da Curva S-N (Alumínio 2024-T4)

O critério de dimensionamento considerado foi o critério mais conservativo, de Soderberg (Subcapítulo 6.1.3).

A tensão alternada corrigida pelo critério de Soderberg vem na seguinte forma:

$$\sigma_{alternada\ corrigida} = \frac{\sigma_m}{\left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_c}\right)} \Leftrightarrow \frac{122MPa}{\left(1 - \frac{122MPa}{325MPa}\right)} = 195MPa$$

Relacionando a tensão alternada corrigida com o número de ciclos impostos, através da curva S-N característica pode-se obter o dano induzido e a vida à fadiga em termos de números de ciclos, como ilustrado na Figura 6.20.

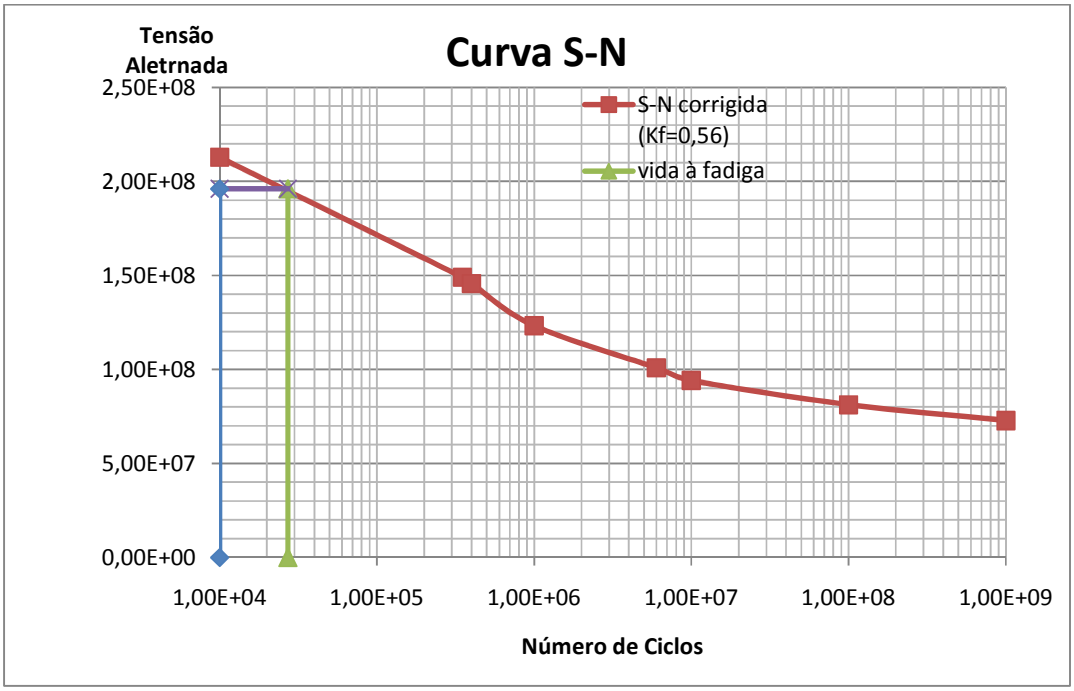


Figura 6. 20 - Obtenção da Vida à Fadiga Através da Curva S-N (Alumínio 2024-T4)

A vida à fadiga obtida foi de 27100 ciclos e o dano induzido no veio, calculado através da Lei de Miner foi o seguinte:

$$\frac{\textit{número de ciclos impostos } (n)}{\textit{vida à fadiga } (N)} = \frac{10000}{27100} = 0.369 \cong 36.9\%$$

Os resultados obtidos através do *Software* encontram-se nas Figuras 6.20 e 6.21, que correspondem a dano acumulado e vida à fadiga em termos de número de ciclos respectivamente.

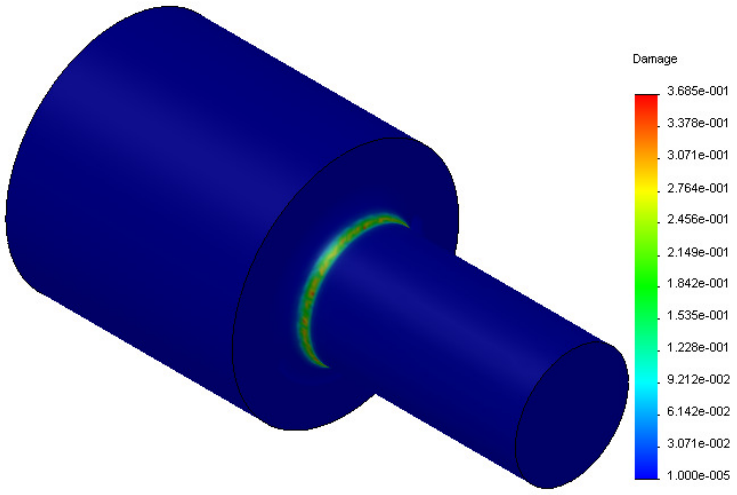


Figura 6. 21 - Dano Acumulado no Veio (Alumínio 2024-T4) Obtido Através do Software

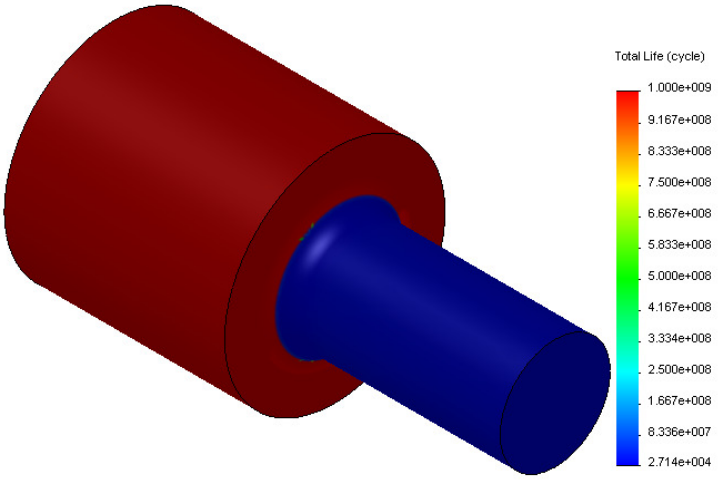


Figura 6. 22 – Vida à Fadiga do Veio (Alumínio 2024-T4) Obtido Através do Software

Verifica-se que os valores de dano induzido no veio e a vida à fadiga obtidos através do *Software* SolidWorks/CosmosWorks foram os mesmos obtidos por via analítica com diferenças inferiores a 1%. Pelo que ficou validado o uso do *Software* na estimativa de vida à fadiga de componentes.

6.3. Estimativa de Vida à Fadiga da Antepara 17

Uma vez validado o uso do Software nas tarefas de previsão de dano e de vida à fadiga, procedeu-se à estimativa de vida à fadiga da Antepara 17 através do SolidWorks/CosmosWorks, tendo em conta o espectro de carga real obtido através do ensaio de extensometria efectuado a esta.

O espectro de carga real, ou bloco de carregamento, correspondente ao percurso 1, foi introduzido no *Software*, como ilustrado na Figura 6.23, e obteve-se a matriz de *rainflow* correspondente, com a gama de tensão, tensão média e número de ciclos por cada evento, como ilustrado no histograma apresentado na Figura 6.24.

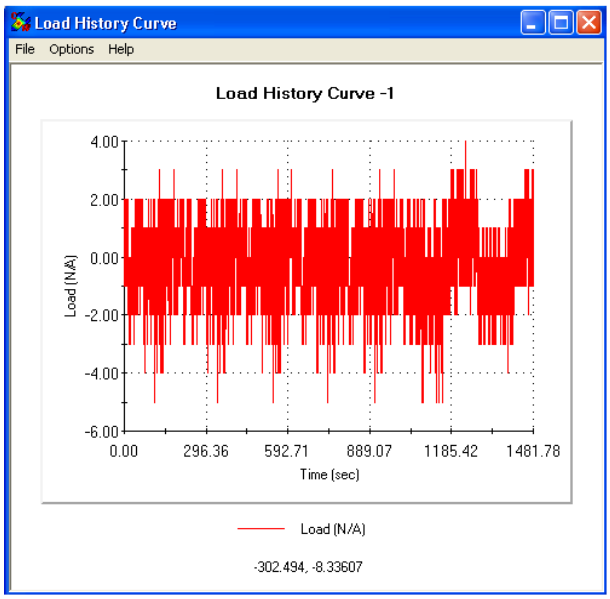


Figura 6. 23 - Espectro de Carga Real Introduzido

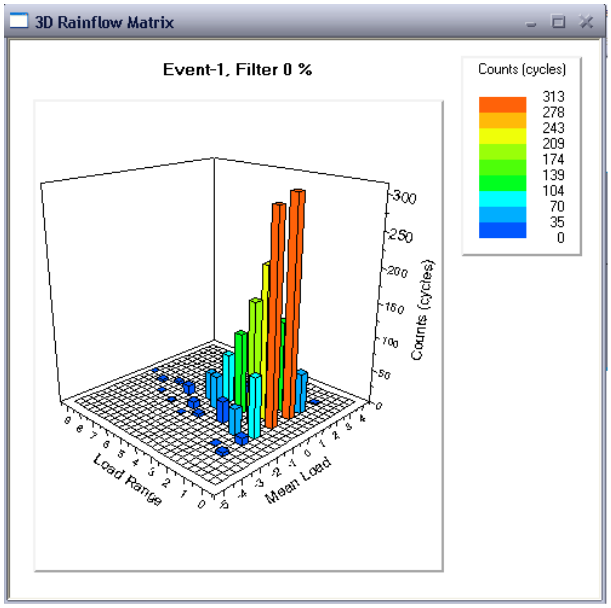


Figura 6. 24 – Histograma da matriz de *Rainflow* obtida

O alumínio utilizado nas chapas das Anteparas (5083-H111) e o alumínio utilizado nos reforços (6082-T6) têm uma tensão de rotura de 317 e 310MPa, respectivamente. A curva S-N utilizada para a estimativa de vida à fadiga da Antepara foi retirada da referência bibliográfica [3], que corresponde a alumínios com tensão de rotura superior a 260MPa, como ilustrado na Figura 6.25.

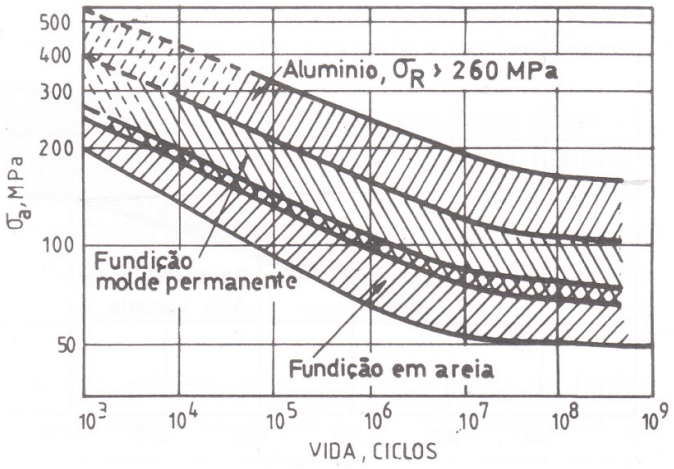


Figura 6. 25 - Curvas S-N Retirada da Referência Bibliográfica [3]

A curva introduzida no *Software* e característica das ligas de alumínio utilizadas na construção das Anteparas foi a representada na Figura 6.26.

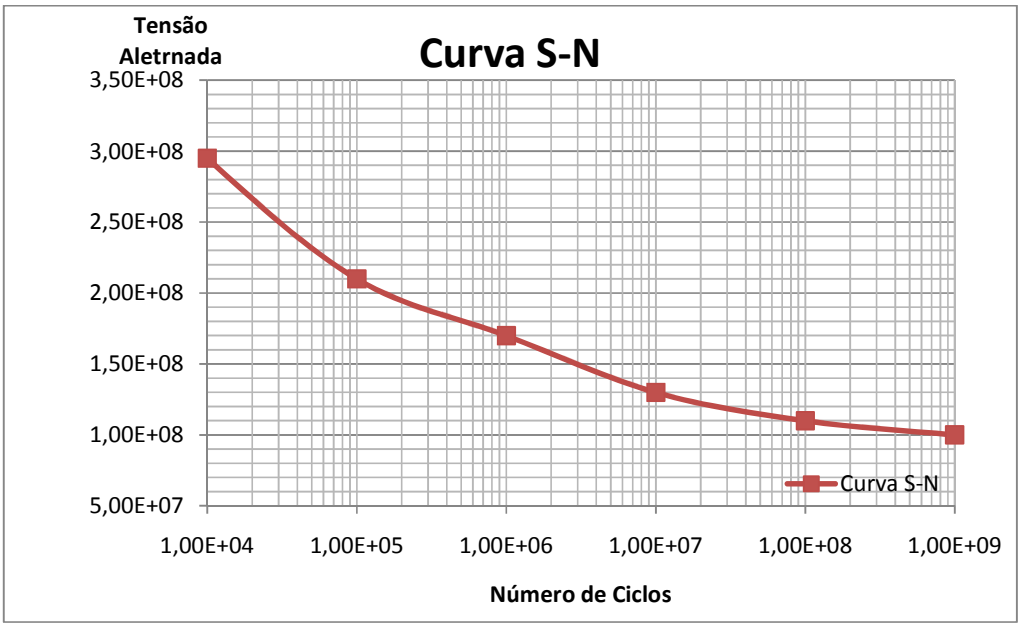


Figura 6. 26 - Curva S-N Característica dos Alumínios das Anteparas

Dado que a tensão média correspondente ao espectro de carga real é diferente de zero (Fig.6.24), o critério de dimensionamento considerado foi o critério mais conservativo, de Soderberg (Subcapítulo 6.1.3).

Os factores de redução para a tensão admissível de fadiga (Subcapítulo 6.1.4) considerados foram:

- k1 = 0.72 (coeficiente representativo do efeito de acabamento superficial laminado, Figura 6.13);
- k2 = 1 - coeficiente representativo do factor dimensão;
- k3 = 0.85 - coeficiente representativo do factor de carga axial;
- k4 = 1 - coeficiente representativo para tipo de solicitação;
- K5 = 1 - coeficiente representativo do efeito da temperatura;
- Kf = 1 - representa o factor dinâmico de concentração de tensões.

Ficando:

$$K = k1 \times k2 \times k3 \times k4 \times k5 \times Kf \Leftrightarrow$$
$$K = 0.72 \times 1 \times 0.85 \times 1 \times 1 \times 1 = 0.61$$

Introduzidos os dados no *Software* os resultados em termos de vida à fadiga em número de blocos de carregamento e dano por bloco encontram-se nas Figuras seguintes, respectivamente 6.27 e 6.28.

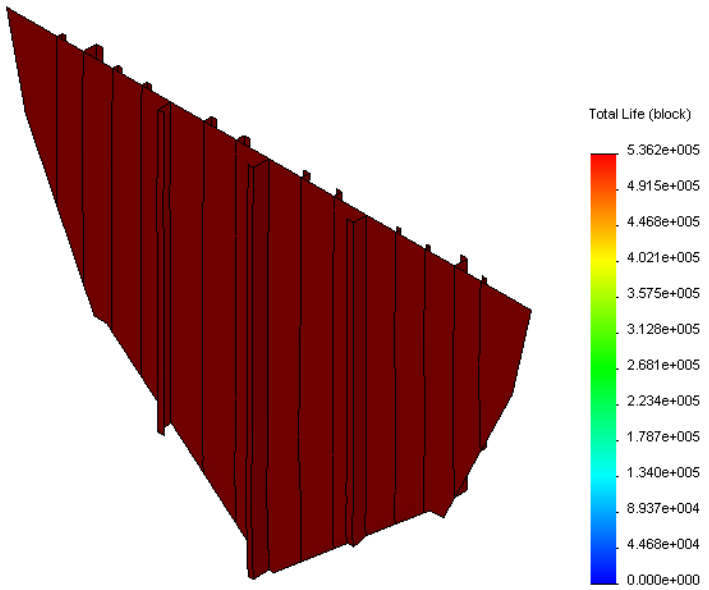


Figura 6. 27 – Vida à Fadiga da Antepara 17 Obtido Através do Software de MEF

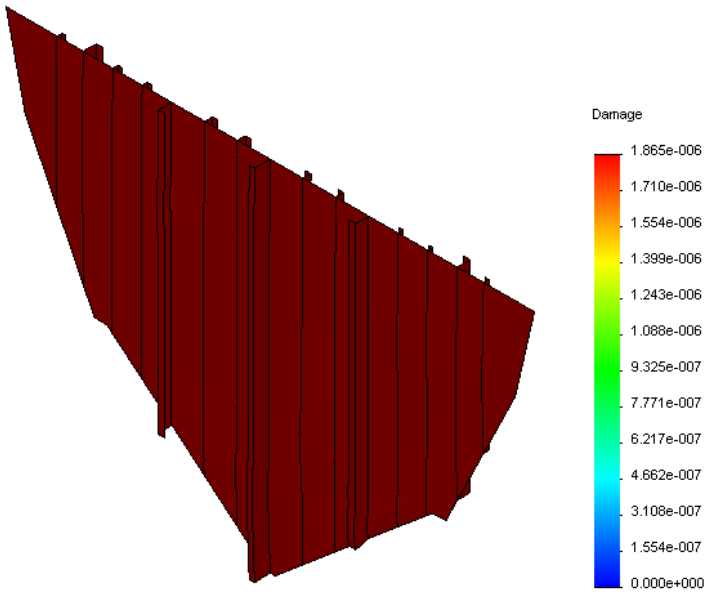


Figura 6. 28 – Dano acumulado na Antepara 17 Obtido Através do Software de MEF

Da análise dos resultados retira-se que:

- Dano para o espectro introduzido = 1,8E-6
- Vida à fadiga = 5,362E5 blocos

Conclui-se que, para uma utilização típica da embarcação Salva-Vidas de aproximadamente 400 horas de navegação por ano, e para o espectro de carga introduzido, a vida à fadiga da Antepara corresponde a 220000 horas de navegação, o que se pode considerar vida infinita para o tipo de utilização referida.

7. Conclusões

Considerações Finais:

Mais do que todas as conclusões que foram inseridas ao longo do texto deste trabalho, resta terminar formulando algumas considerações finais.

Verificou-se através da modelação 3D das Anteparas 3 e 17 das embarcações Salva-Vidas da Classe Vigilante (Capítulo 5) que:

- Para o caso de carregamento devido ao *Slamming,* carregamento exclusivamente no plano, os reforços sofrem pouca solicitação. A tensão máxima é induzida na chapa da Antepara e equivalente à pressão de carregamento. A distribuição de tensões é equivalente na Antepara com reforços e na Antepara sem reforços. Porém o deslocamento máximo diminui substancialmente com a introdução dos reforços (até 95%).

- Para a situação de hipotético alagamento de compartimentos estanques, a tensão máxima é induzida no reforço central principal com aproximadamente 200MPa (a tensão de cedência da liga de alumínio utilizada nos reforços é de 228MPa). Isto deve-se à condição de vão máximo e maior altura dos reforços principais e consequente de maior distância relativa ao eixo neutro da Antepara. As tensões induzidas na chapa das Anteparas não excedem porém os 35MPa.

- As tensões induzidas pelo carregamento lateral hidrostático são sempre inferiores às tensões induzidas pelo carregamento lateral constante (aproximadamente 40% inferiores).

- Os defeitos iniciais têm pouca influência para qualquer das situações de carregamento no plano e pressão lateral. O efeito dos defeitos é anulado com a introdução dos reforços.

- A comparação de tensões induzidas entre as Anteparas perfeitas e com defeitos iniciais levou à conclusão que as tensões induzidas nas Anteparas com defeitos iniciais são em geral, e para alguns pontos, inferiores às tensões induzidas nas Anteparas perfeitas (até 15%), possivelmente devido aos efeitos de membrana e da chapa semelhante à corrugada.

- Os resultados obtidos através dos dois *Softwares* utilizados SolidWorks/CosmosWorks e Ansys foram idênticos para a maioria das situações, embora com alguma predominância de os resultados obtidos em Ansys serem superiores aos obtidos através de SolidWorks/CosmosWorks. As maiores diferenças não excedem 13%, e verificam-se apenas na obtenção do valor de tensão máxima nos reforços principais. Para os restantes pontos as diferenças rondam os 5% como apresentado em detalhe no Anexo 4.

As provas de mar realizadas com a intenção de encontrar uma estimativa de vida à fadiga da Antepara 17, tiveram lugar com condições de mar favoráveis à navegação, isto é altura de onda significativa baixa (30cm). Para estas condições, a vida à fadiga da Antepara 17 obtida através do *Software* SolidWorks/CosmosWorks (capítulo 6) foi de aproximadamente 220000 horas de navegação que se pode considerar vida infinita para um espectro de utilização média da embarcação de 400 horas por ano.

Desenvolvimentos Futuros

Sugere-se que os temas abordados neste trabalho possam ser alvo de reflexões futuras, fruto de considerações de um grupo de especialistas na matéria, que possibilitem aos interessados um aprofundamento de saberes.

Em síntese, resta referir que os objectivos inicialmente propostos foram realizados, recomendando-se para trabalhos futuros:

- A modelação das Anteparas e uma extensão de estrutura adjacente: convés, costado, fundo e respectivos reforços.

- A confirmação dos valores obtidos por extensometria recorrendo à realização de novos testes de mar.

- A realização de testes de mar para condições mais desfavoráveis à navegação com o intuito de estimativa de vida à fadiga das Anteparas para este tipo de solicitação.

- Relacionar a dimensão da zona afectada termicamente (ZAT) com parâmetros relevantes, tais como, processo de soldadura utilizado na união dos reforços com a chapa das Anteparas, entrega térmica, o tipo de material base utilizado e outros parâmetros de soldadura.

8. Referências Bibliográficas

[1] – ***Revista da Armada***, de Janeiro de 2008

[2] - Ministério da Defesa Nacional, ***Embarcação Salva-Vidas UAM 602 - "ATENTO"***

[3] – Branco, C. Moura; Fernandes, A. Augusto; Castro, Paulo, ***Fadiga de Estruturas Soldadas,*** 2ª Edição, 1999, Edição da Fundação Calouste Gulbenkian

[4] - Instituto Politécnico de Leiria, ***Alumínio e Ligas de Alumínio***

[5] – Dirras, Guy F.; Donnadieu, Patricia; and Douin, Joel, ***Dislocation/Precipitate Interaction Mechanisms in 6xxx Aluminium Alloys***

[6] – Matias, Carlos, ***Estudo do comportamento de ligas de alumínio***, Janeiro de 2008

[7] - Matos J. A. Boto, ***Estudo do Comportamento mecânico/estrutural de painéis reforçados em ligas de alumínio de construção naval***, Julho de 2008

[8] - ***The Naval Architect***, Setembro 2008, Feature 7

[9] – Silva, Paulo P. ; Pereira, Carlos A. ; Mateus, António F., ***Performance Enhacement of Structural Details in Aluminium Crafts***, 2004

[10] - Matos, João; Silva, Paulo; Martins, R.F.; Mateus, A.R., ***Influence of production defects in the structural resistance of reinforced panels in aluminium crafts***, IRF'2009-Integrity, reliability and Failure, Chapter XII: Product Design and Development, pg 409, 410, Ed. JF Silva Gomes and Shaker Meguid, ISBN: 978-972-8826-22-2, July 2009

[11] – ***Rules and Regulations for Classification of Special ServiceCraft***, Lloyd's Register of Shipping, 1999, London

[12] – Azevedo, Álvaro F. M., ***Método dos Elementos Finitos***, Abril de 2003

[13] - Jawad, Maan H., ***Theory and design of plates and shell structures***

[14] – Reddy, J.N., ***Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells – Theory and Analysis***, Second Edition

[15] Urgueira, António P. Vale, ***Fundamentos de Extensometria Eléctrica***, Outubro de 2006

[16] Brusamarello, Prof. Valner, ***Células de Carga***

[17] Barreira, Luísa, ***Introdução à Extensometria***, 2007, consultado no site

[18] - Vibration Trainning Quick Reference – Glossary Diagnostic Guide, Useful Charts and Tables, Mobius Institute

[19] – Branco, C. Moura, ***Mecânica dos Materiais,*** 3ª Edição, Edição da Fundação Calouste Gulbenkian

Anexos

Anexo 1. – Ligas de Alumínio[36]

1a – Liga de Alumínio 5083 (Chapa das Anteparas)

Aluminum 5083-H112	
Categories:	Metal; Nonferrous Metal; Aluminum Alloy; 5000 Series Aluminum Alloy
Material Notes:	This alloy has very good corrosion resistance (susceptible to deterioration after prolonged exposure to elevated temperatures) and moderate strength. Its weldability is a plus. It finds uses in transportation, pressure vessels, cryogenics, towers and drilling rigs, gas/oil piping, ordnance, and armor plate.
	Data points with the AA note have been provided by the Aluminum Association, Inc. and are NOT FOR DESIGN.
	Composition Notes:
	Composition information provided by the Aluminum Association and is not for design.
Key Words:	UNS A95083; ISO AlMg4.5Mn; Aluminium 5083-H112; AA5083-H112

Physical Properties	Metric	English
Density	2.66 g/cc	0.0961 lb/in³
Mechanical Properties	**Metric**	**English**
Hardness, Brinell	81	81
Hardness, Knoop	104	104
Hardness, Rockwell B	50	50
Hardness, Vickers	91	91
Tensile Strength, Ultimate	300 MPa	43500 psi
Tensile Strength, Yield	190 MPa	27600 psi
Elongation at Break	16.0 %	16.0 %
Modulus of Elasticity	70.3 GPa	10200 ksi
Compressive Modulus	71.7 GPa	10400 ksi
Poissons Ratio	0.330	0.330
Shear Modulus	26.4 GPa	3830 ksi
Shear Strength	180 MPa	26100 psi

[36] www.matweb.com

Electrical Properties	Metric	English
Electrical Resistivity	0.00000590 ohm-cm	0.00000590 ohm-cm
Thermal Properties	**Metric**	**English**
CTE, linear	23.8 µm/m-°C	13.2 µin/in-°F
	@Temperature 20.0 - 100 °C	@Temperature 68.0 - 212 °F
	26.0 µm/m-°C	14.4 µin/in-°F
	@Temperature 20.0 - 300 °C	@Temperature 68.0 - 572 °F
Specific Heat Capacity	0.900 J/g-°C	0.215 BTU/lb-°F
Thermal Conductivity	117 W/m-K	812 BTU-in/hr-ft²-°F
Melting Point	590.6 - 638 °C	1095 - 1180 °F
Solidus	590.6 °C	1095 °F
Liquidus	638 °C	1180 °F
Processing Properties	**Metric**	**English**
Annealing Temperature	413 °C	775 °F
Hot-Working Temperature	316 - 482 °C	600 - 900 °F
Component Elements Properties	**Metric**	**English**
Aluminum, Al	92.4 - 95.6 %	92.4 - 95.6 %
Chromium, Cr	0.050 - 0.25 %	0.050 - 0.25 %
Copper, Cu	<= 0.10 %	<= 0.10 %
Iron, Fe	<= 0.40 %	<= 0.40 %
Magnesium, Mg	4.0 - 4.90 %	4.0 - 4.90 %
Manganese, Mn	0.40 - 1.0 %	0.40 - 1.0 %
Other, each	<= 0.050 %	<= 0.050 %
Other, total	<= 0.15 %	<= 0.15 %
Silicon, Si	<= 0.40 %	<= 0.40 %
Titanium, Ti	<= 0.15 %	<= 0.15 %
Zinc, Zn	<= 0.25 %	<= 0.25 %

1b – Liga de Alumínio 6082-T6 (Reforços das Anteparas)

Aluminum 6082-T6	
Categories:	Metal; Nonferrous Metal; Aluminum Alloy; 6000 Series Aluminum Alloy
Material Notes:	Material specs taken from SAPA / Indalex manual on extrusions.
	Data points with the AA note have been provided by the Aluminum Association, Inc. and are NOT FOR DESIGN.
	Composition Notes:
	Composition information provided by the Aluminum Association and is not for design.
Key Words:	EU Numerical EN-AW-6082; EU Chemical AlSi1MgMn; AA6082; Sweden: SS-EN-AW-6082; Aluminium 6082-T6

Physical Properties	**Metric**	**English**
Density	2.70 g/cc	0.0975 lb/in³
Mechanical Properties	**Metric**	**English**
Hardness, Vickers	95	95
Tensile Strength, Ultimate	290 MPa	42100 psi
	310 MPa	45000 psi
Tensile Strength, Yield	250 MPa	36300 psi
	260 MPa	37700 psi
Elongation at Break	10.0 %	10.0 %
Thermal Properties	**Metric**	**English**
Thermal Conductivity	170 W/m-K	1180 BTU-in/hr-ft²-°F
Component Elements Properties	**Metric**	**English**
Aluminum, Al	95.2 - 98.3 %	95.2 - 98.3 %
Chromium, Cr	<= 0.25 %	<= 0.25 %
Copper, Cu	<= 0.10 %	<= 0.10 %
Iron, Fe	<= 0.50 %	<= 0.50 %
Magnesium, Mg	0.60 - 1.20 %	0.60 - 1.20 %
Manganese, Mn	0.40 - 1.0 %	0.40 - 1.0 %
Other, each	<= 0.050 %	<= 0.050 %
Other, total	<= 0.15 %	<= 0.15 %
Silicon, Si	0.70 - 1.30 %	0.70 - 1.30 %
Titanium, Ti	<= 0.10 %	<= 0.10 %
Zinc, Zn	<= 0.20 %	<= 0.20 %

Anexo 2. – Curvas tensão-extensão

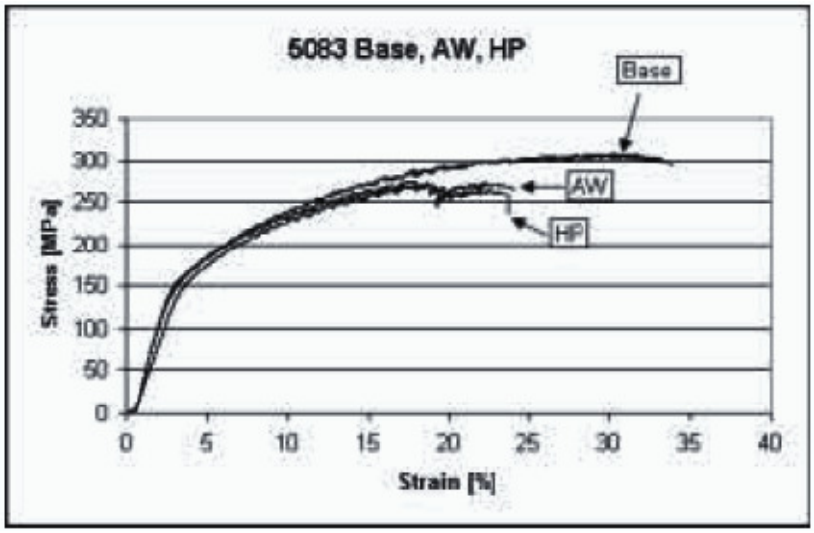


Figura A. 1 - Liga de alumínio 5083-H111

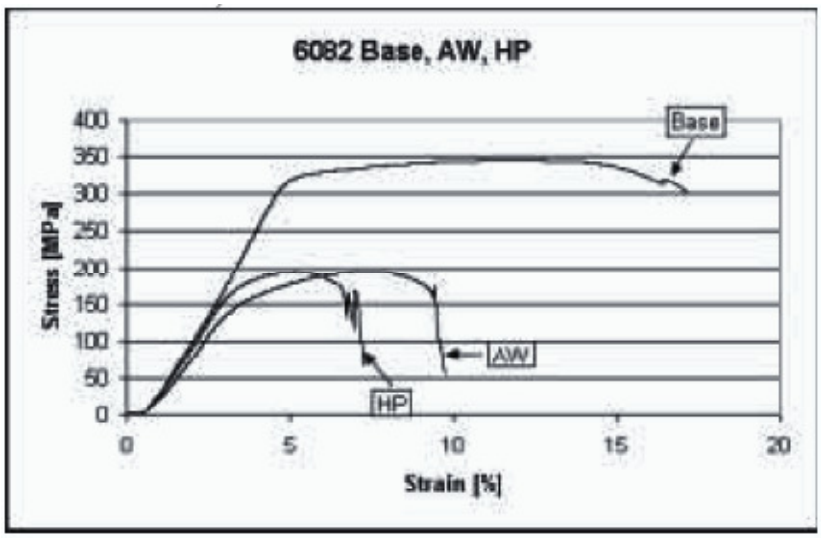
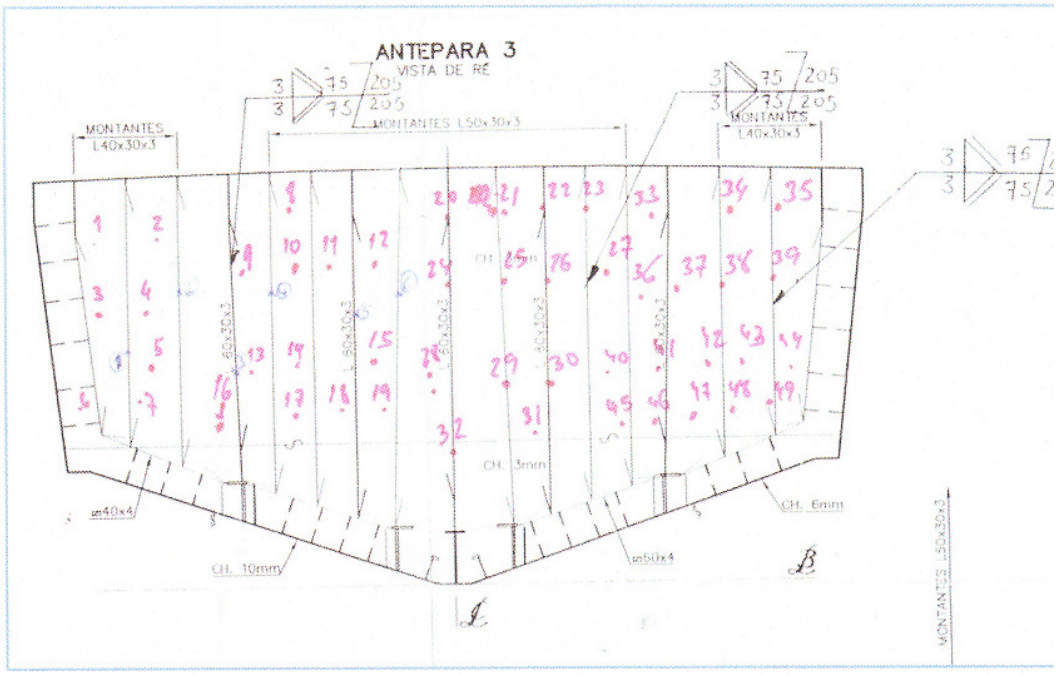
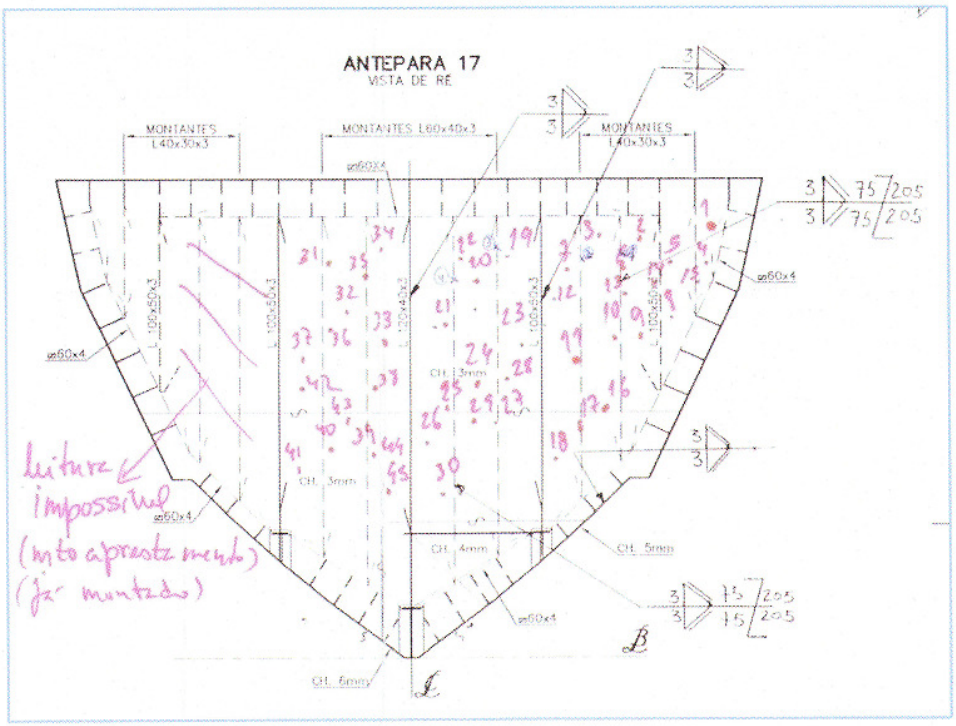


Figura A. 2 - Liga de alumínio 6082-T6

As curvas com a designação Base referem-se a provetes sem efeitos de soldadura, AW corresponde a provetes com cordão de soldadura e HP provetes com cordão de soldadura e submetidos a "martelagem"

Anexo 3. – Pontos de medição de deformações





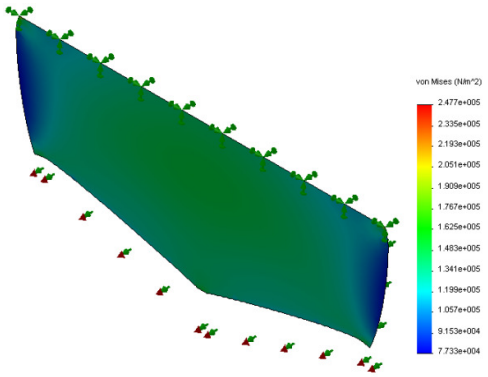
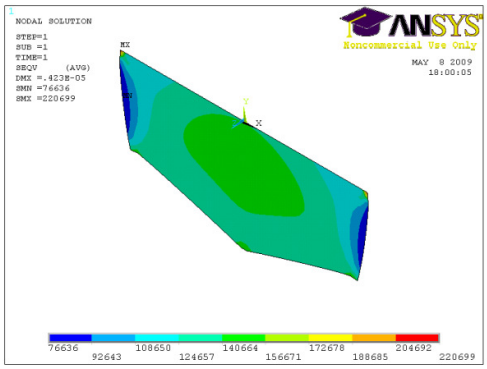
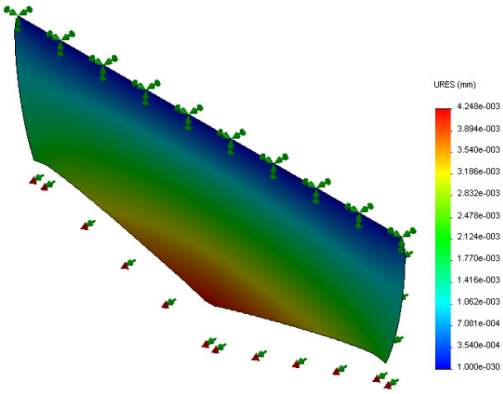
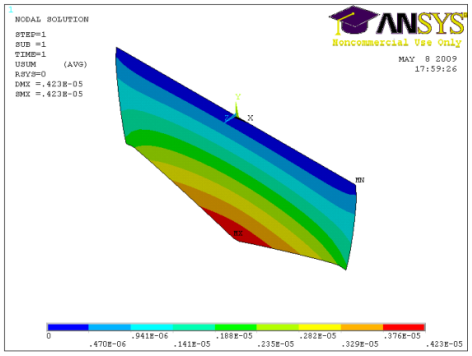
Anexo 4. – Análise Comparativa CosmosWorks/Ansys

2a - Análise Comparativa entre CosmosWorks e Ansys (Antepara 3)

1. Carregamento no Plano (150KPa)

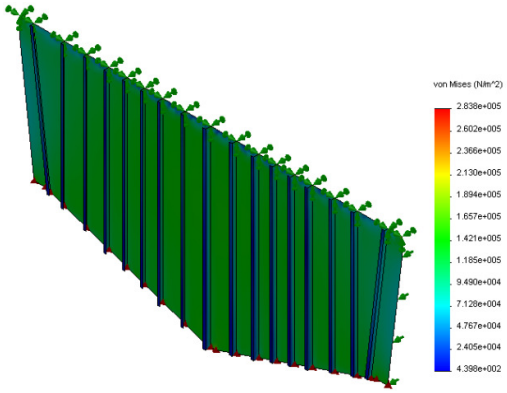
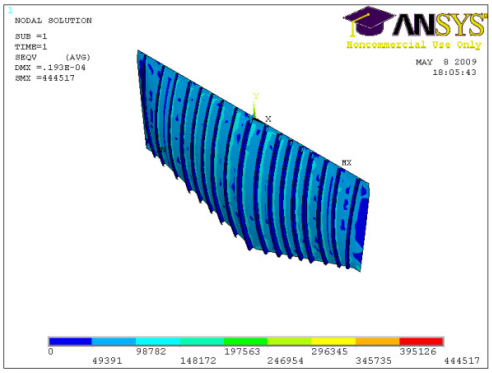
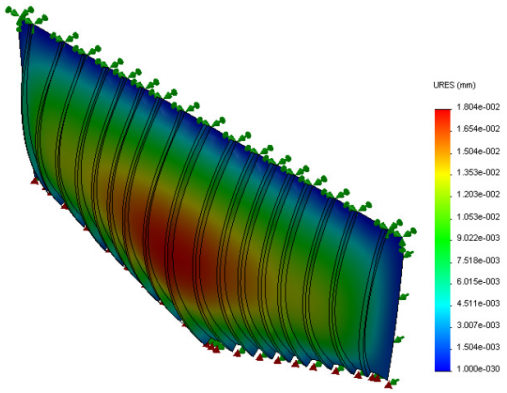
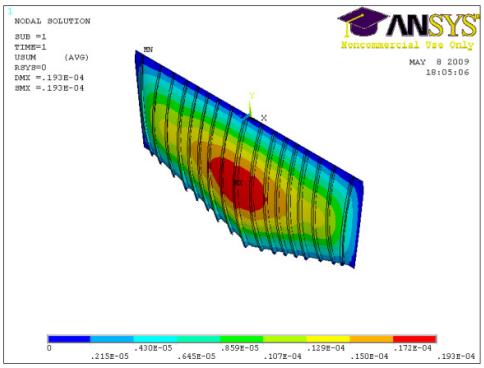
1.1 Antepara Perfeita Sem Reforços

	CosmosWorks	***Ansys***		**Diferença [%]**
Tensão a Meio Vão	0,150	0,150	MPa	0,0
Deslocamento Máximo	4,30E-03	4,30E-03	mm	0,0

CosmosWorks	***Ansys***
Tensão 	Tensão 
Deslocamento 	Deslocamento 

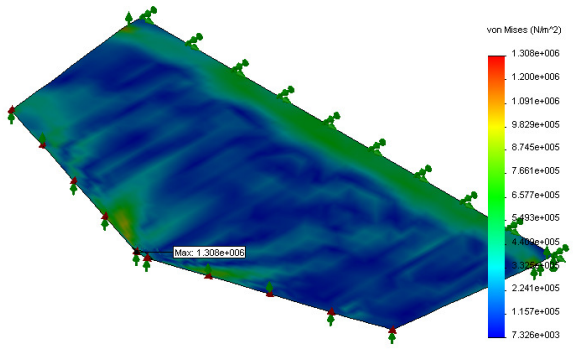
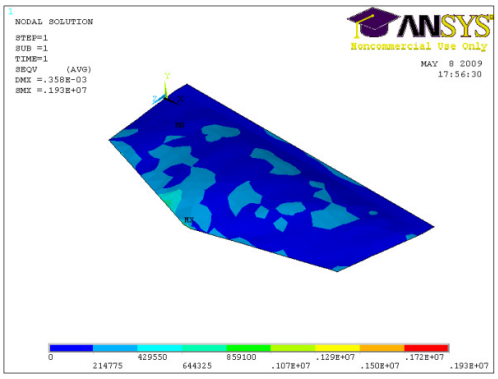
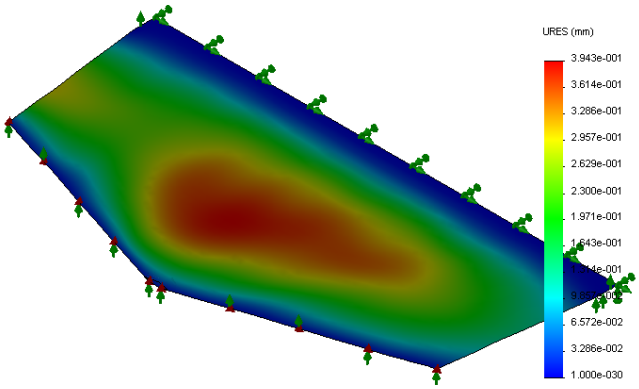
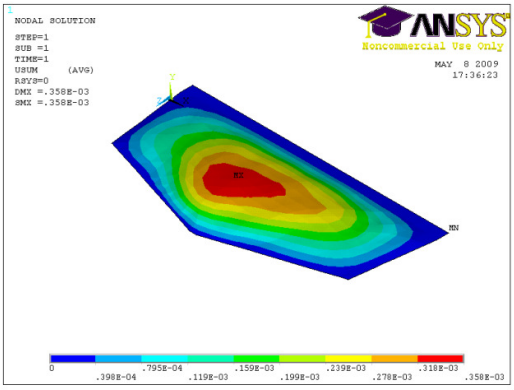
1.2 Antepara Perfeita com Reforços

	CosmosWorks	***Ansys***		**Diferença [%]**
Tensão Máxima na Antepara	0,145	0,147	MPa	1,3
Tensão Máxima no Reforço Principal	0,044	0,049	MPa	3,4
Deslocamento Máximo	0,180E-03	0,193E-03	mm	0,01

CosmosWorks	***Ansys***
Tensão 	Tensão 
Deslocamento 	Deslocamento 

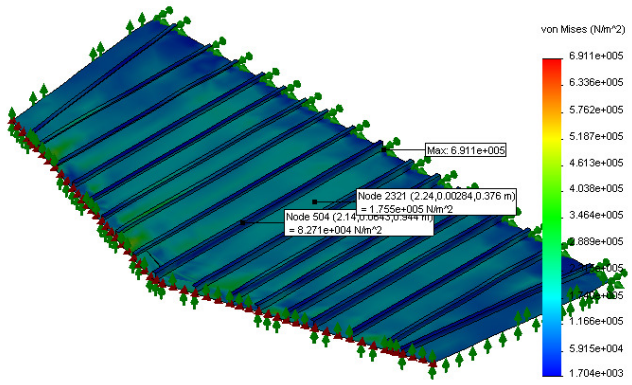
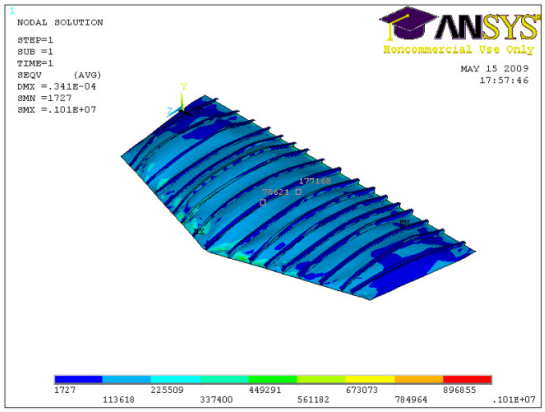
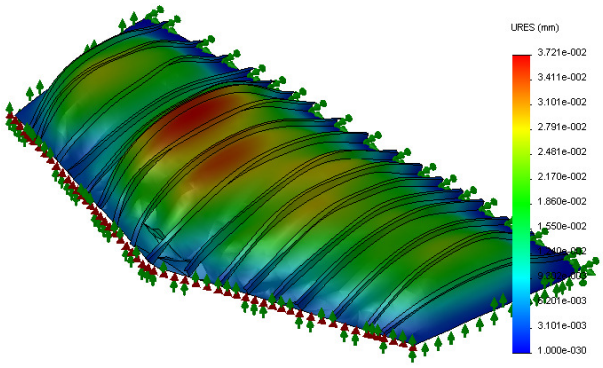
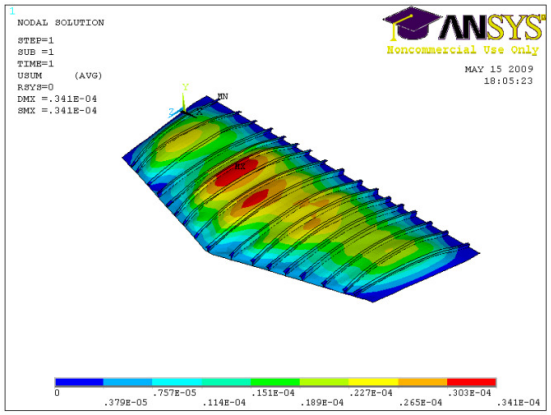
1.3 Antepara Com Defeitos Iniciais Sem Reforços

	CosmosWorks	***Ansys***		**Diferença** [%]
Tensão a Meio Vão	0,214	0,214	MPa	0,0
Deslocamento Máximo	0,394E-01	0,358E-01	mm	9,1

CosmosWorks	***Ansys***
Tensão 	Tensão 
Deslocamento 	Deslocamento 

1.4 Antepara Com Defeitos Iniciais Com Reforços

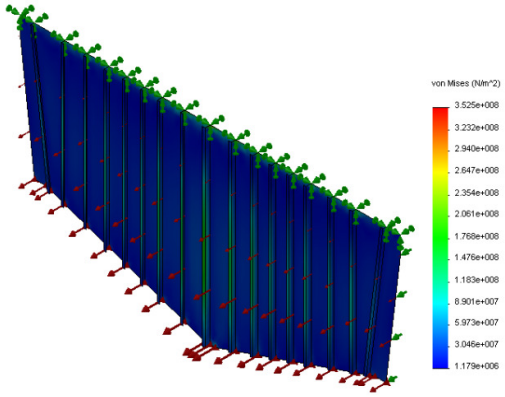
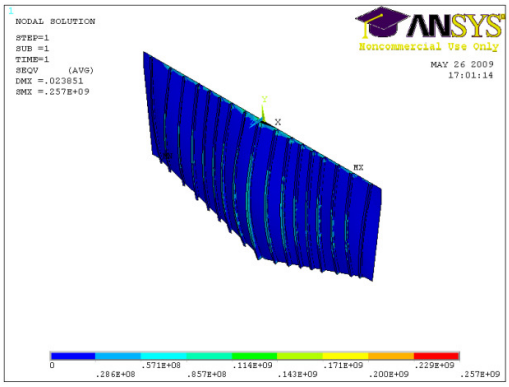
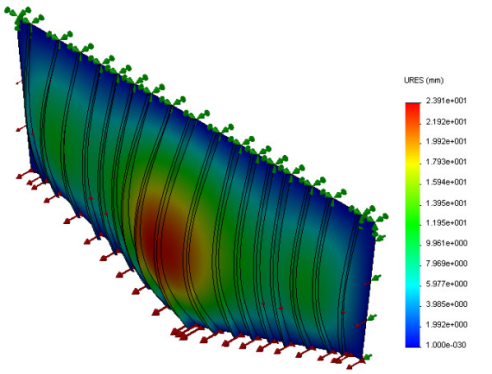
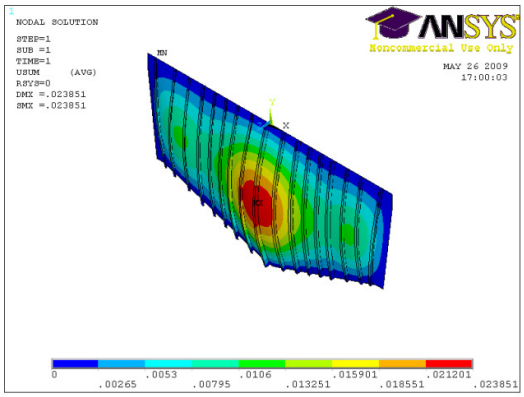
	CosmosWorks	*Ansys*		Diferença [%]
Tensão Média na Antepara	0,175	0,177	MPa	1,1
Tensão Máxima no Reforço Principal	0,082	0,078	MPa	4,8
Deslocamento Máximo	0,37E-03	0,34E-03	mm	8,1

CosmosWorks	*Ansys*
Tensão 	Tensão 
Deslocamento 	Deslocamento 

2. Carregamento no Plano (150 KPa) mais Pressão Lateral (Hidrostática/ Constante)

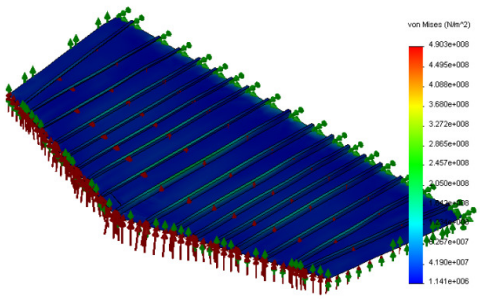
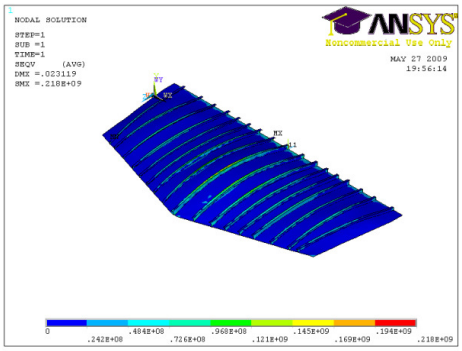
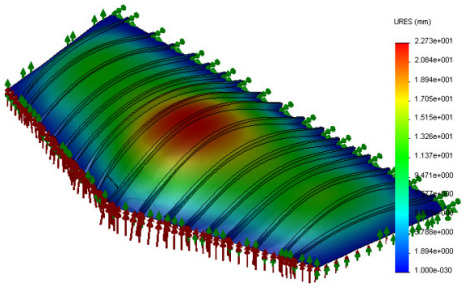
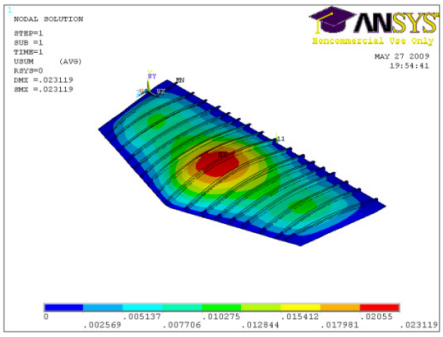
2.1 Antepara Perfeita com Reforços, Carregamento no Plano mais Pressão Lateral Hidrostática

	CosmosWorks	***Ansys***		**Diferença [%]**
Tensão no ponto de valor de tensão máxima, coordenada (-30, 1200, 60)	190	178	MPa	6,3
Tensão no reforço adjacente ao central, coordenada (220,1200,50)	155	165	MPa	6,0
Tensão no reforço adjacente ao central na união com a placa, coordenada (-250,1200,0)	16,5	16,7	MPa	1,2
Tensão num ponto da placa entre reforços, coordenada (125,1200,0)	17	18	MPa	5,5
Ponto de um reforço não central, coordenada (-500, 1200, 60)	130	124	MPa	4,6
Deslocamento Máximo	23,9	23,9	mm	0

CosmosWorks	***Ansys***
Tensão 	Tensão 
Deslocamento 	Deslocamento 

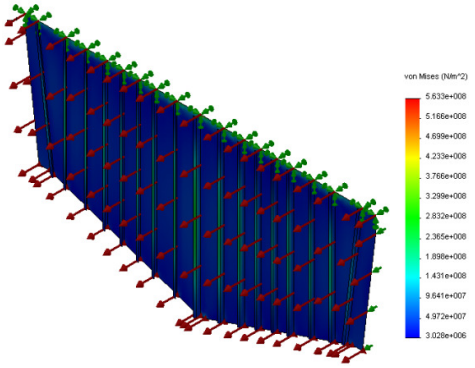
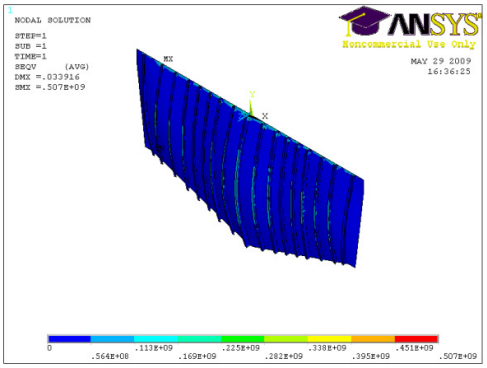
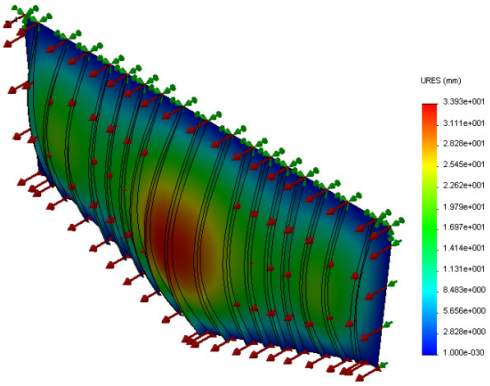
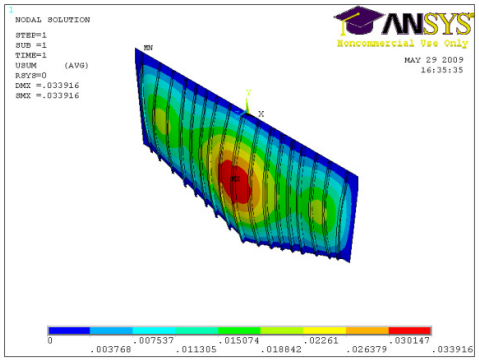
2.2 Antepara com defeitos iniciais, pressão lateral hidrostática

	CosmosWorks	*Ansys*		Diferença [%]
Tensão no ponto de valor de tensão máxima, coordenada (-30, 1200, 60)	199	190	MPa	4,5
Tensão no reforço adjacente ao central, coordenada (220,1200,50)	155	150	MPa	3,2
Tensão no reforço adjacente ao central na união com a placa, coordenada (-250,1200,0)	13,9	13,7	MPa	1,44
Tensão num ponto da placa entre reforços, coordenada (125,1200,0)	23	24	MPa	4,17
Ponto de um reforço não central, coordenada (-500, 1200, 60)	151	141	MPa	6,6
Deslocamento Máximo	22,7	23,1	mm	1,73

CosmosWorks	*Ansys*
Tensão 	Tensão 
Deslocamento 	Deslocamento 

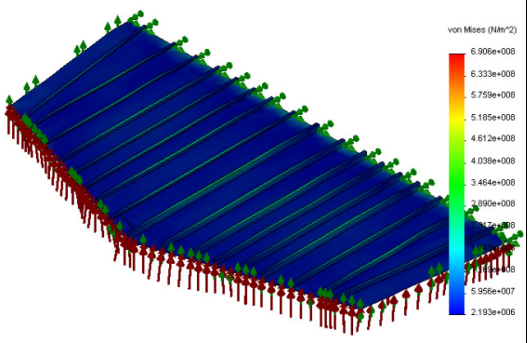
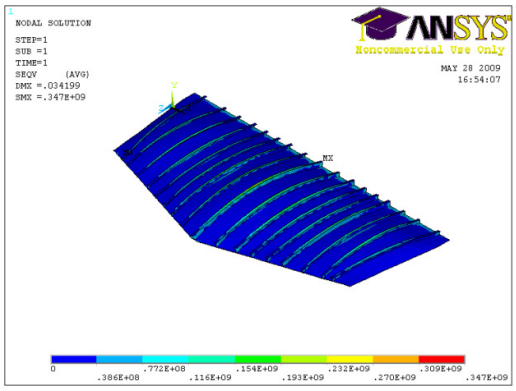
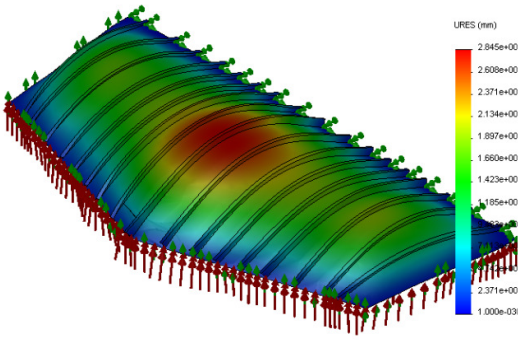
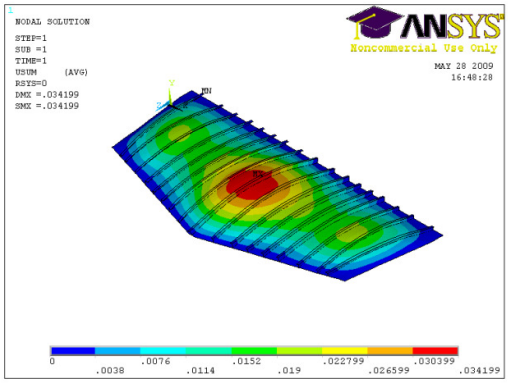
2.3 Antepara perfeita, pressão lateral constante (15300Pa)

	CosmosWorks	*Ansys*		Diferença [%]
Tensão no ponto de valor de tensão máxima, coordenada (-30, 1200, 60)	258	224	MPa	13,1
Tensão no reforço adjacente ao central, coordenada (220,1200,50)	205	188	MPa	8,3
Tensão no reforço adjacente ao central na união com a placa, coordenada (-250,1200,0)	23	22,4	MPa	2,6
Tensão num ponto da placa entre reforços, coordenada (125,1200,0)	41	37	MPa	9,7
Ponto de um reforço não central, coordenada (-500, 1200, 60)	188	180	MPa	4,26
Deslocamento Máximo	33,9	33,9	mm	0,0

CosmosWorks	*Ansys*
Tensão	Tensão
	
Deslocamento	Deslocamento
	

2.4 Antepara com defeitos iniciais, pressão lateral constante (15300Pa)

	CosmosWorks	*Ansys*		Diferença [%]
Tensão no ponto de valor de tensão máxima, coordenada (-30, 1200, 60)	239	262	MPa	8,78
Tensão no reforço adjacente ao central, coordenada (220,1200,50)	183	202	MPa	9,4
Tensão no reforço adjacente ao central na união com a placa, coordenada (-250,1200,0)	17	19	MPa	10,5
Tensão num ponto da placa entre reforços, coordenada (125,1200,0)	32,9	34,4	MPa	4,3
Ponto de um reforço não central, coordenada (-500, 1200, 60)	188	194	MPa	3,2
Deslocamento Máximo	28,5	34,1	mm	16,4

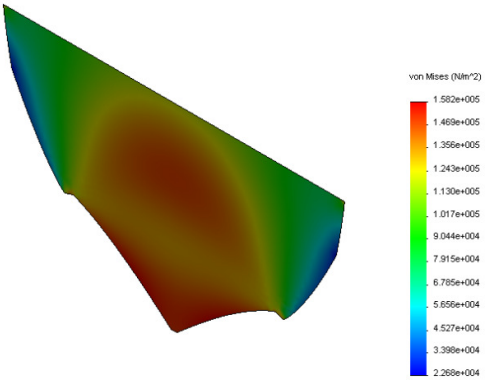
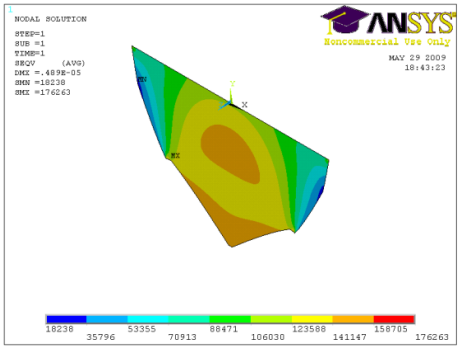
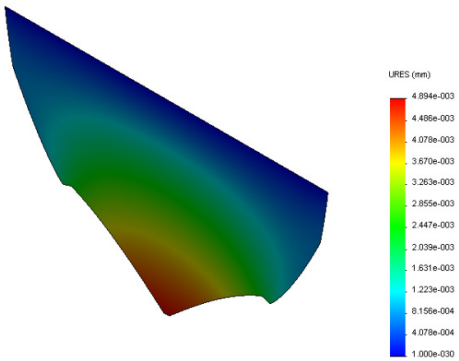
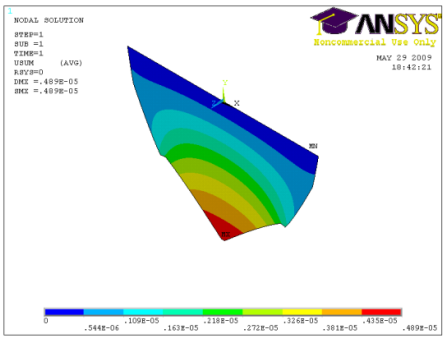
CosmosWorks	*Ansys*
Tensão	Tensão
	
Deslocamento	Deslocamento
	

2b - Análise Comparativa entre CosmosWorks e Ansys (Antepara 17)

1. Carregamento no plano (150Kpa)

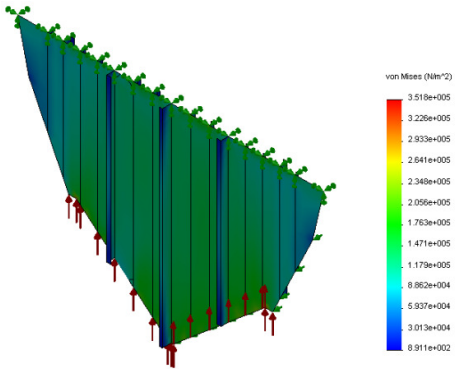
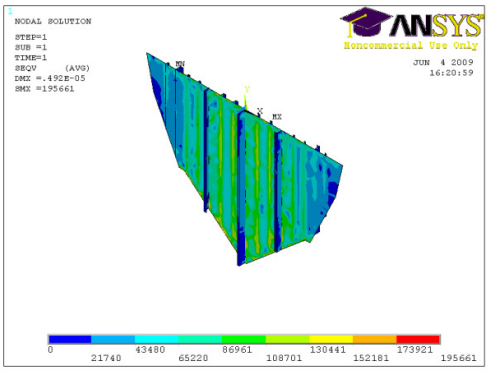
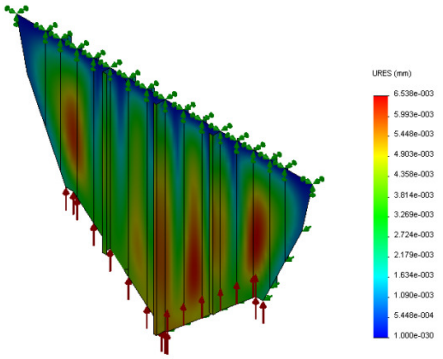
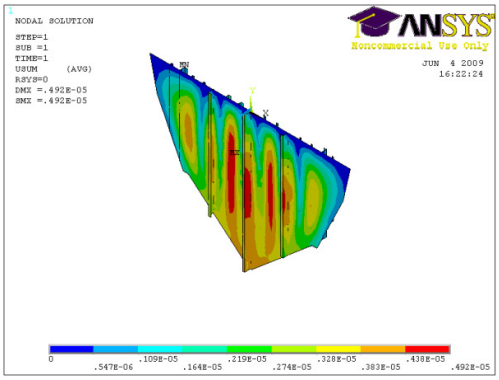
1.1 Antepara perfeita sem reforços

	CosmosWorks	***Ansys***		**Diferença [%]**
Tensão a Meio Vão	0,150	0,150	MPa	0,0
Deslocamento Máximo	4,89E-03	4,89E-03	mm	0,0

CosmosWorks	***Ansys***
Tensão 	Tensão 
Deslocamento 	Deslocamento 

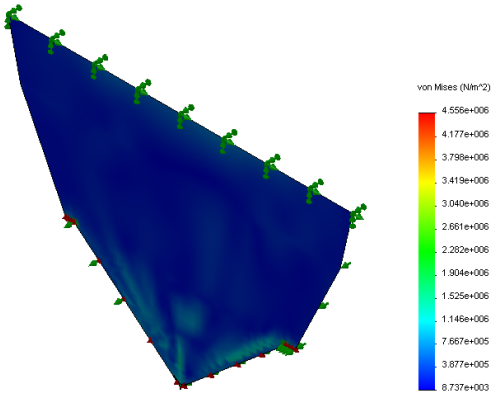
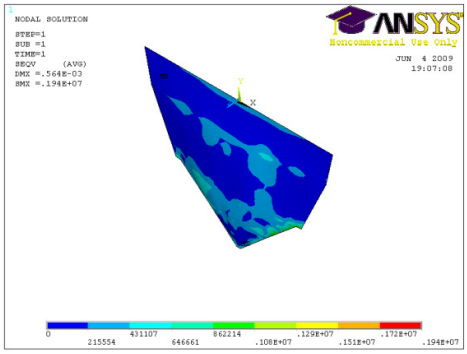
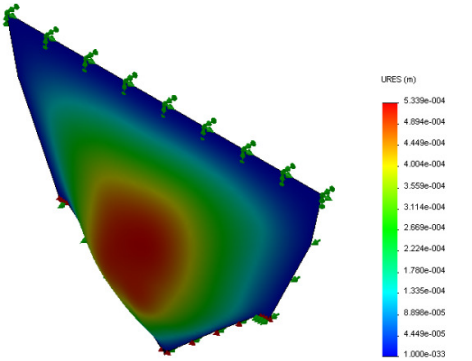
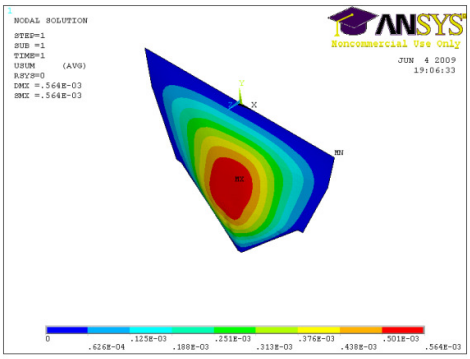
1.2 Antepara perfeita com reforços

	CosmosWorks	***Ansys***		**Diferença [%]**
Tensões a Meio Vão na Antepara, coordenada (125, -1400,0)	0,134	0,130	MPa	1,3
Tensão Máxima no Reforço Principal, coordenada (-40,1400,120)	0,095	0,092	MPa	3,4
Deslocamento Máximo	6.538E-03	4,920E-03	mm	0,01

CosmosWorks	***Ansys***
Tensão 	Tensão 
Deslocamento 	Deslocamento 

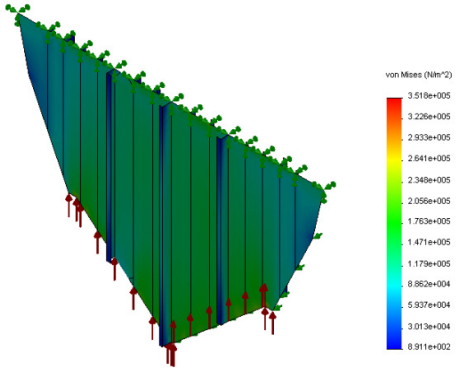
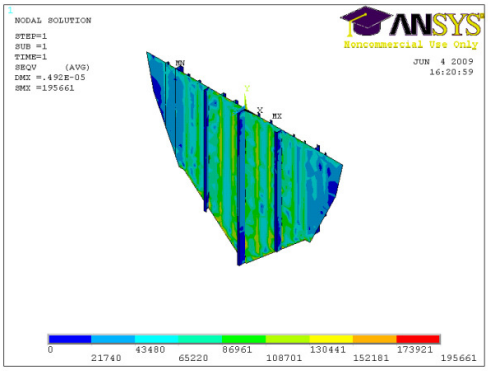
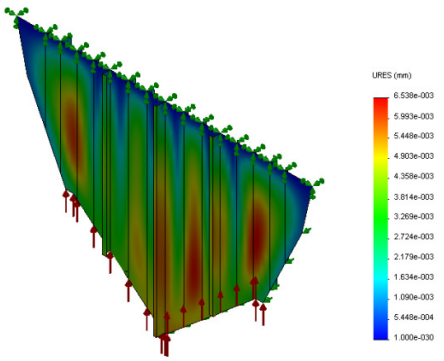
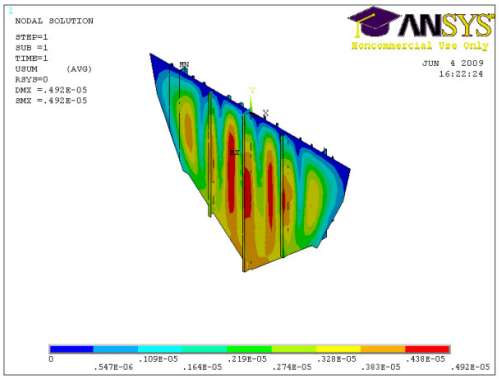
1.3 Antepara com defeitos iniciais sem reforços

	CosmosWorks	*Ansys*		Diferença [%]
Tensão a meio vão na Antepara, coordenada (0, -1400,0)	0,144	0,148	MPa	2,7
Deslocamento Máximo	0,533E-03	0,564E-03	mm	9,1

CosmosWorks	*Ansys*
Tensão 	Tensão 
Deslocamento 	Deslocamento 

1.4 Antepara com defeitos iniciais com reforços

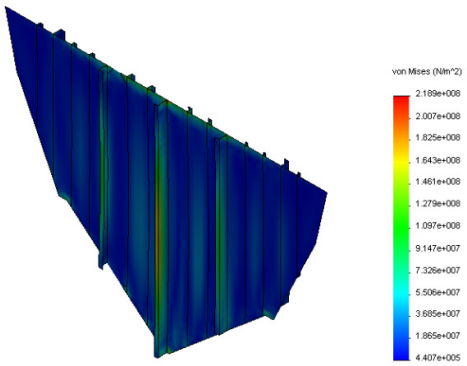
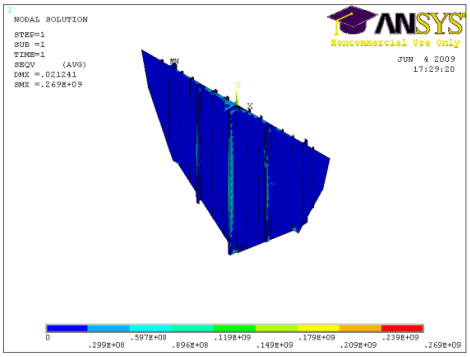
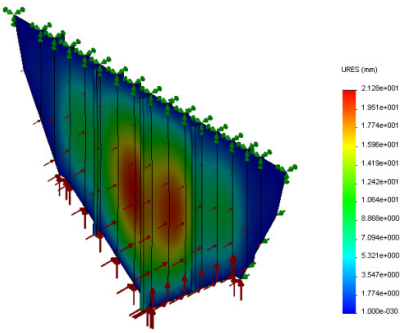
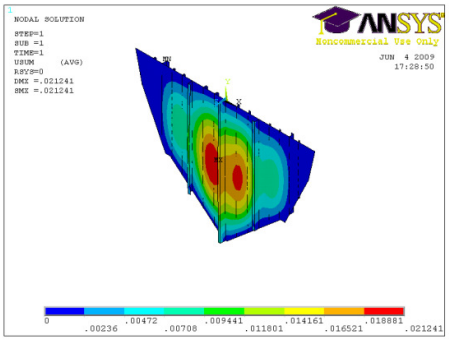
	CosmosWorks	***Ansys***		**Diferença [%]**
Tensões a Meio Vão na Antepara, coordenada (125, -1400,0)	0,132	0,128	MPa	1,3
Tensão Máxima no Reforço Principal, coordenada (-40,1400,120)	0,098	0,100	MPa	3,4
Deslocamento Máximo	6.538E-03	4,920E-03	mm	0,01

CosmosWorks	***Ansys***
Tensão 	Tensão 
Deslocamento 	Deslocamento 

2. Carregamento no pano (150 KPa) mais pressão lateral (hidrostática/pressão constante)

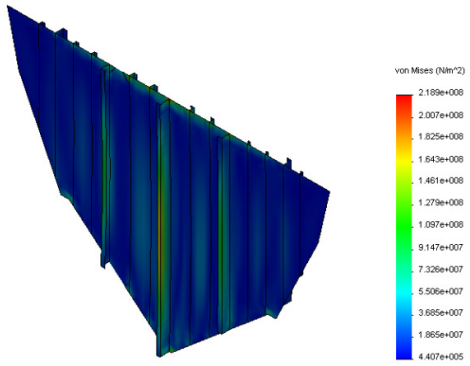
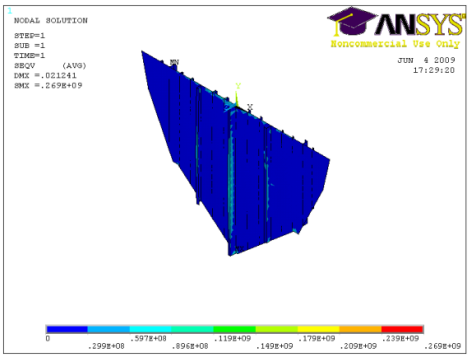
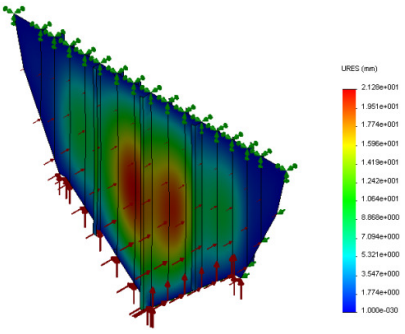
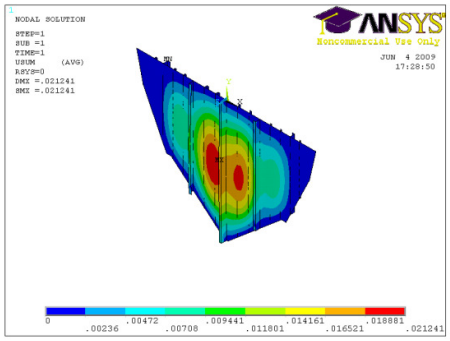
2.1 Antepara perfeita com reforços, pressão lateral hidrostática

	CosmosWorks	Ansys		Diferença [%]
Tensão no ponto de valor de tensão máxima, coordenada (-40, 1400, 120)	166	147	MPa	11,4
Tensão no reforço adjacente ao central, coordenada (210,1400,-60)	130	123	MPa	9
Tensão no reforço adjacente ao central na união com a placa, coordenada (-250,1400,0)	22,4	19,7	MPa	1,2
Tensão num ponto da placa entre reforços, coordenada (125,1400,0)	14	15	MPa	6,6
Ponto de um reforço não central, coordenada (-500, 1400, -60)	116	114	MPa	1,7
Deslocamento Máximo	21,2	21,2	mm	0

CosmosWorks	***Ansys***
Tensão 	Tensão 
Deslocamento 	Deslocamento 

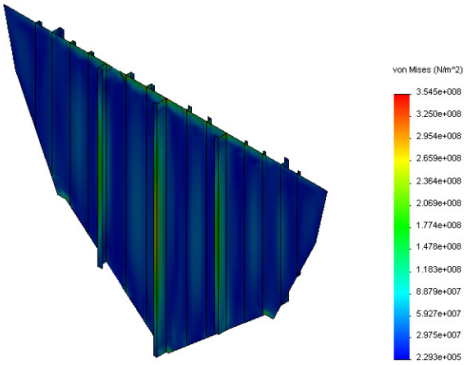
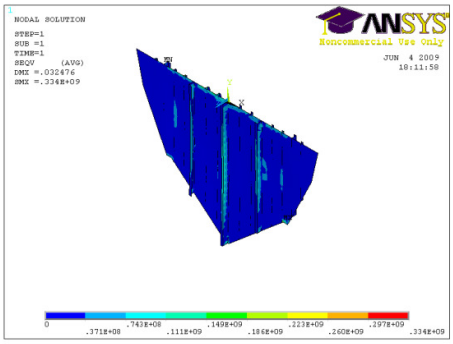
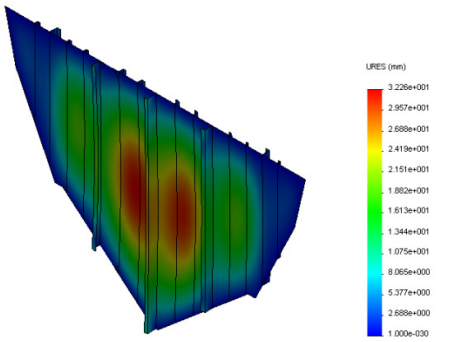
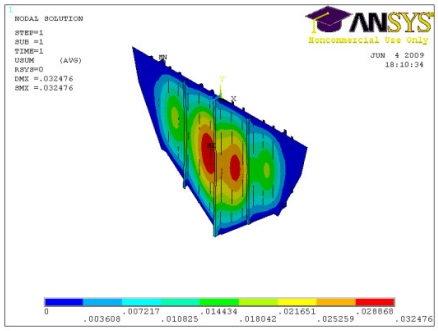
2.2 Antepara com defeitos iniciais, pressão lateral hidrostática

	CosmosWorks	***Ansys***		**Diferença [%]**
Tensão no ponto de valor de tensão máxima, coordenada (-30, 1200, 60)	125	143	MPa	12,5
Tensão no reforço adjacente ao central, coordenada (220,1200,50)	110	117	MPa	5,9
Tensão no reforço adjacente ao central na união com a placa, coordenada (-250,1200,0)	30	32	MPa	6,2
Tensão num ponto da placa entre reforços, coordenada (125,1200,0)	11	12	MPa	8,3
Ponto de um reforço não central, coordenada (-500, 1200, 60)	113	119	MPa	5,0
Deslocamento Máximo	22,7	23,1	mm	1,73

CosmosWorks	***Ansys***
Tensão 	Tensão 
Deslocamento 	Deslocamento 

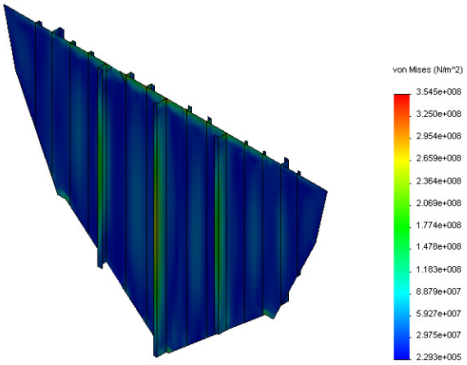
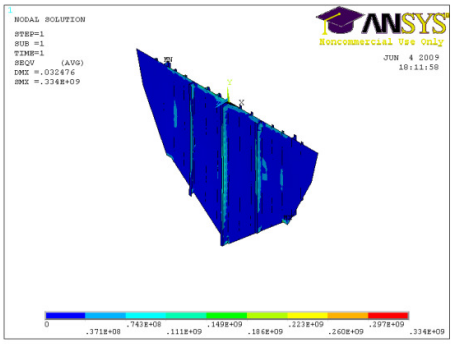
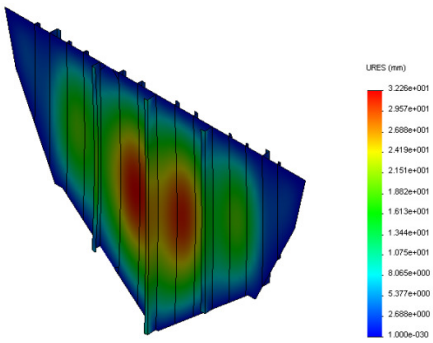
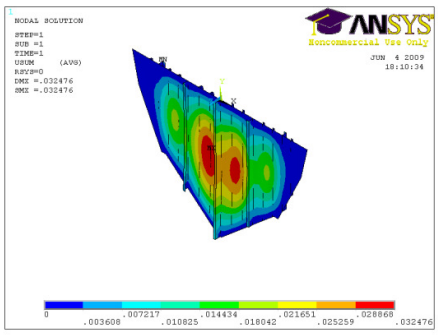
2.3 Antepara perfeita, pressão lateral constante (19800Pa)

	CosmosWorks	*Ansys*		Diferença [%]
Tensão no ponto de valor de tensão máxima, coordenada (-40, 1400, 120)	252	268	MPa	5,9
Tensão no reforço adjacente ao central, coordenada (210,1400,-60)	180	185	MPa	2,7
Tensão no reforço adjacente ao central na união com a placa, coordenada (-250,1400,0)	25	27	MPa	7,4
Tensão num ponto da placa entre reforços, coordenada (125,1400,0)	11	12	MPa	8,3
Ponto de um reforço não central, coordenada (-500, 1400, -60)	182	194	MPa	6,1
Deslocamento Máximo	32,2	32,4	mm	0

CosmosWorks	*Ansys*
Tensão 	Tensão 
Deslocamento 	Deslocamento 

2.4 Antepara com defeitos iniciais, pressão lateral constante (19800Pa)

	CosmosWorks	*Ansys*		Diferença [%]
Tensão no ponto de valor de tensão máxima, coordenada (-30, 1200, 60)	251	272	MPa	7,7
Tensão no reforço adjacente ao central, coordenada (220,1200,50)	147	141	MPa	4,0
Tensão no reforço adjacente ao central na união com a placa, coordenada (-250,1200,0)	48	49	MPa	2,0
Tensão num ponto da placa entre reforços, coordenada (125,1200,0)	23	26	MPa	11,5
Ponto de um reforço não central, coordenada (-500, 1200, 60)	177	169	MPa	4,5
Deslocamento Máximo	28,5	34,1	mm	16,4

CosmosWorks	*Ansys*
Tensão 	Tensão 
Deslocamento 	Deslocamento 

Anexo 5. – Técnicas Experimentais de Extensometria [17]

Preparação da Superfície para Instalação de um Extensómetro:

A fidelidade das Leituras efectuadas com extensómetros está intimamente relacionada com a perfeita aderência deste sobre a superfície do material em estudo. Toda e quaisquer imperfeições ocorridas durante a fixação do extensómetro irão posteriormente gerar interpretações erróneas das reais deformações ocorridas numa determinada zona. Desta forma torna-se necessária, uma apurada técnica de fixação dos extensómetros para evitar eventuais erros na avaliação das deformações superficiais.
Os extensómetros podem ser fixados em qualquer material sólido, desde que a sua superfície tenha sido perfeitamente preparada. A preparação da superfície tem como objectivo criar uma área quimicamente limpa, com uma rugosidade apropriada e com linhas de referências para a instalação do extensómetro. A preparação da superfície possui basicamente cinco etapas:

1 - Desengorduramento da superfície;
2 - Alisamento da superfície;
3 - Criação das linhas de referência;
4 - Condicionamento da superfície;
5 - Neutralização da superfície;

1. Desengorduramento da Superfície

O desengorduramento (Figura A.1) deve ser realizado para remover óleos, graxas, contaminantes orgnicos e resíduos químicos solúveis. O desengorduramento deve ser sempre a primeira etapa do processo de preparação da superfície.

Figura A. 3 – Desengorduramento da Superfície

Os desengordurantes em forma de Spray apresentam um melhor resultado que os demais, mas a acetona pura ou álcool etílico também podem cumprir estas funções. Deve utilizar-se um pano ou papel sem pêlo para realizar a limpeza de toda a área de trabalho e se possível abranger ainda uma área entre 100 a 150 mm de ambos os lados em relação a posição de montagem do extensómetro. A limpeza deve ser realizada apenas e sempre numa só direcção.

2. Alisamento da Superfície

A superfície deve ser lixada (Figura A.2) de forma a serem removidas quaisquer impurezas ou contaminantes existentes (tais como tintas, óxido, etc.) e ainda produzir uma rugosidade superficial própria para a instalação do extensómetro. No caso de a superfície ser muito rugosa e ser necessário utilizar lixas de diferente granulometría, estas devem ser utilizadas sempre da

mais grossa para a mais fina. Caso seja necessário, a preparação da superfície pode ser iniciada com a utilização de discos abrasivos para a remoção da camada mais espessa das impurezas.

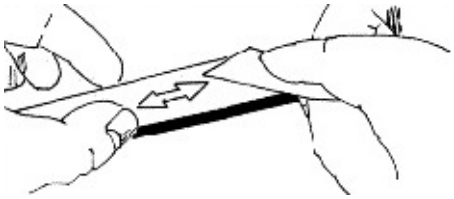


Figura A. 4 – Alisamento da Superfície

Quando for obtida uma superfície brilhante e com um acabamento uniforme, esta deverá ser limpa com uma gaze seca. Essa limpeza deve garantir a remoção de toda e qualquer partícula abrasiva ou impureza existente na área durante a operação de alisamento. Também se deve garantir que essas mesmas impurezas não retornem a essa área limpando sempre a superfície na mesma direcção.

3. Criação de Linhas de Referência

Devem ser traçadas duas linhas perpendiculares na área de instalação do extensómetro para servirem de referência na operação de colagem e alinhamento do mesmo conforme a Figura A.3. As linhas de referência podem ser produzidas por um polimento diferenciado do existente na superfície ou com um marcador tendo em atenção que estas linhas não devem passar pela zona onde o extensómetro vai ser colado. As impurezas ou resíduos originados nesta etapa devem ser totalmente removidos da área de trabalho tal como nas etapas anteriores, antes da fase seguinte.

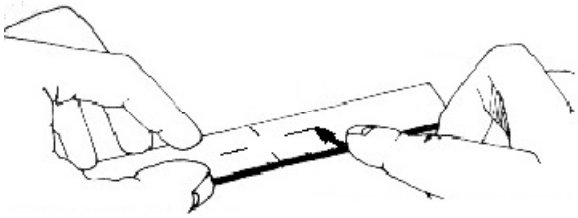


Figura A. 5 - Criação de Linhas de Referência

4. Condicionamento da Superfície

Após traçar as linhas de referência deve limpar-se a zona de colagem do extensómetro com um condicionador e espalhá-lo com um papel sem pêlo ou gaze num só sentido e sempre com o papel limpo (uma passagem para cada pedaço de papel limpo). A utilização do papel deve continuar até que este não seja mais manchado pelas impurezas da superfície (Figura A.4). Se necessário pode adicionar-se mais condicionador durante esse procedimento.

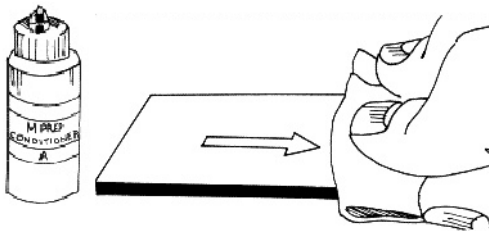


Figura A. 6 - Condicionamento da Superfície

5. Neutralização da superfície

A neutralização da superfície na zona de colagem deve ser efectuada utilizando um neutralizador, aplicando-o da mesma forma que o condicionador no ponto anterior. (Figura A.5)

Figura A. 7 - Neutralização da Superfície

A secagem da superfície deve ser feita com um papel ou uma gaze limpa e seca com um movimento em sentido único. Para completar a secagem deve ser utilizada outra nova gaze.
Seguindo todas as recomendações descritas acima, a superfície está pronta para a colagem do extensómetro, que deverá ser colocado em 30 minutos (no máximo) em peças de Alumínio e dentro de 45 minutos em peças de aço.

6. Colagem do Extensómetro

Os extensómetros de resistência eléctrica são capazes de indicar deformações extremamente pequenas ocorridas numa superfície. Essa característica é dependente do processo de colagem, pois se o extensómetro não for correctamente instalado na área em estudo, serão obtidos dados imprecisos a respeito das deformações ocorridas. As técnicas demonstradas a seguir foram repetidas inúmeras vezes na instalação de extensómetros, tendo demonstrado uma grande eficiência nos resultados.

6.1. Manuseamento e Preparação

Remover o extensómetro da embalagem utilizando uma pinça e colocá-lo sobre uma placa de vidro ou metal previamente limpa com acetona ou álcool, sempre com a superfície de colagem voltada para baixo (o lado que contém a resistência voltado para cima). Caso seja necessário colocar também os terminais de ligação na placa próximo ao extensómetro.

Nota: Nunca tocar o extensómetro com as mãos!

Cortar um pedaço de fita adesiva própria para a instalação de extensómetros de aproximadamente 100 mm de comprimento. Fixar uma das extremidades da fita próximo do extensómetro, descer lentamente a fita até cobrir todo o extensómetro juntamente e o terminal conforme a Figura A.6. A utilização de fita adesiva não apropriada pode causar a contaminação da área de fixação com o adesivo nela utilizada.

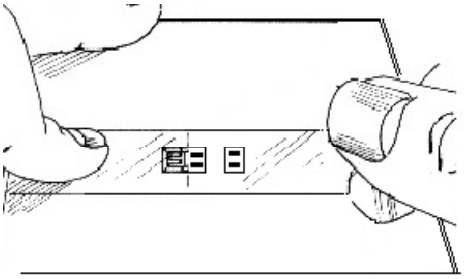


Figura A. 8 - Colagem de Fita Adesiva no Extensómetro

Quando o extensómetro (e se for necessário o terminal) já estiver fixo na fita, levantá-la devagar formando um ngulo entre 30 a 45 graus com a superfície, deve averiguar-se que ambos estão bem colados à fita (Figura A.7). Esse ngulo de retirada torna-se importante pois havendo uma grande inclinação o extensómetro pode sofrer uma deformação comprometendo o seu funcionamento futuro.

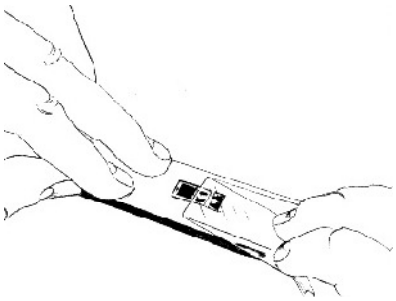


Figura A. 9 - Descolagem da Fita Adesiva com o Extensómetro na Placa

Nesta fase o extensómetro está preparado para ser posicionado na área de ensaio. Para isso devem orientar-se as linhas de referências existentes no extensómetro com as linhas de referências criadas anteriormente na peça conforme a Figura A.8. Quando o extensómetro estiver devidamente posicionado fazer uma inspecção visual pormenorizada e confirmar o correcto posicionamento do extensómetro.

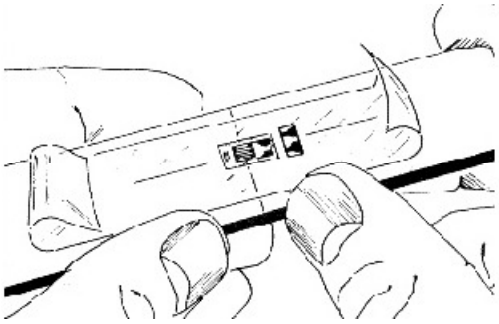


Figura A. 10 - Colagem do Extensómetro na Peça com Orientação das Linhas de Referência

Na preparação do extensómetro para a adição da cola, fixar uma das extremidades da fita com um dedo e fazer o levantamento da outra extremidade com um ngulo semelhante ao utilizado no posicionamento. (Figura A.9)

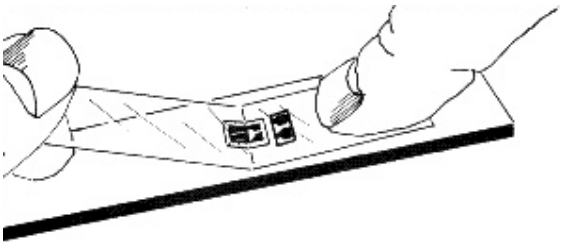


Figura A. 11 - Preparação para a Adição da Cola

Prender a outra extremidade da fita na peça para formar um arco com esta, tendo em conta que as superfícies do extensómetro e do terminal que irão receber a cola devem estar voltados para cima (Figura A.10). Esse posicionamento do extensómetro deve ser feito de forma a não dificultar a posterior colagem.

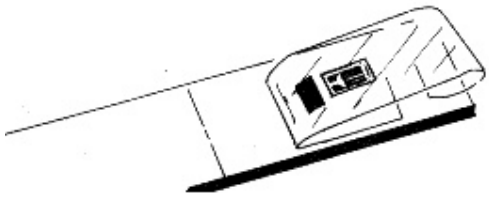


Figura A. 12 - Fase Anterior à Colagem

6.2. Colagem do Extensómetro

Aplicar uma camada fina e contínua de cola sobre as superfícies do extensómetro e do terminal. Para isto deve espalhar-se bem o adesivo com o pincel de aplicação em aproximadamente dez movimentos sempre na mesma direcção (Figura A.11).

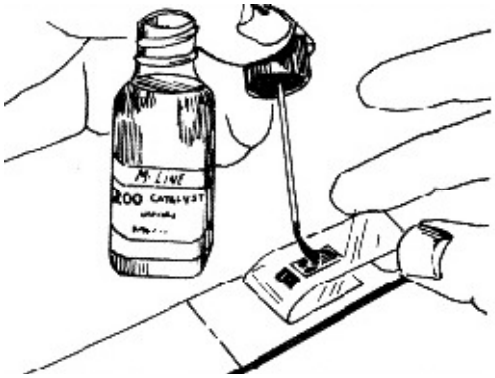


Figura A. 13 - Colocação da Cola no Extensómetro

Posicionar a fita adesiva formando um ngulo de aproximadamente 30 graus com a superfície da peça (Figura A.12), com um movimento lento e firme deslizando uma gaze limpa sobre a fita adesiva, de forma a pressionar o conjunto contra a superfície da peça.

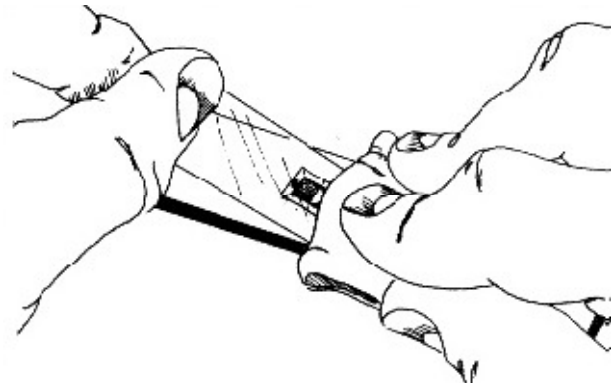


Figura A. 14 - Colagem do Extensómetro

Na sequência da fixação do extensómetro deverá ser feita uma pressão sobre o conjunto (extensómetro + terminal) por aproximadamente 1 a 2 minutos conforme mostrado na Figura A.13. Essa pressão poderá ser efectuada de forma manual, ou ainda através da utilização de uma pinça de pressão. Deverá haver um intervalo mínimo de 2 minutos entre esta etapa e a próxima que consiste na retirada da fita adesiva.

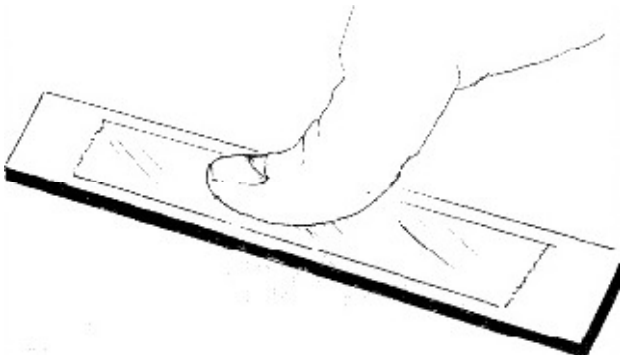


Figura A. 15 - Pressão no Extensómetro para Permitir a Secagem da Cola

O extensómetro deve estar agora perfeitamente aderido a superfície da peça. Para prosseguir na instalação, remover a fita adesiva num movimento lento para evitar danos no extensómetro e no terminal de ligação (Figura A.14). Se for necessário utilizar uma pinça.

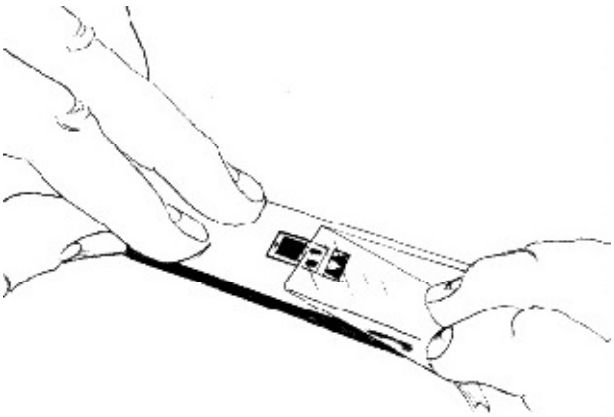


Figura A. 16 - Extracção da Fita Adesiva

7. Técnicas de soldadura

Para a ligação do extensómetro ao aparelho de aquisição de sinal, serão necessários 3 cabos eléctricos. Dois deles devem estar entrelaçados entre si, o terceiro será independente. Antes de iniciar o processo de soldadura dos cabos no extensómetro e no terminal, deve fazer-se uma protecção dos mesmos, deixando em exposição apenas a parte a ser utilizada (aproximadamente 3 mm), isto é, descarnar a extremidade a ser utilizada. Evitar a utilização de facas ou tesouras para efectuar esta operação de forma a não danificar os fios.

Mergulhar a extremidade descarnada do fio em massa de soldar e revesti-la com um pouco (muito pouca) de solda. Aplicar apenas um pingo de solda no extensómetro e no terminal para garantir a fixação. Posicionar os cabos já ponteados para que fiquem alinhados com o pingo colocado no extensómetro, e com auxílio da ponta do ferro de soldar, fazer a união dos mesmos para terminar o processo de soldadura conforme a Figura A.15.

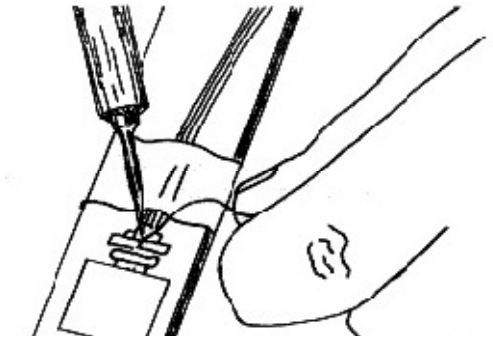


Figura A. 17 - Ligação dos Cabos ao Extensómetro

Com os cabos já fixos, a soldadura deve ser terminada garantindo que estes não venham posteriormente a soltar-se do terminal ou do extensómetro, para isso pode ser utilizado verniz de protecção que confira um bom isolamento entre o extensómetro e a atmosfera evitando o aparecimento de oxidação e a ocorrência de humidade no circuito eléctrico (Figura A.16).

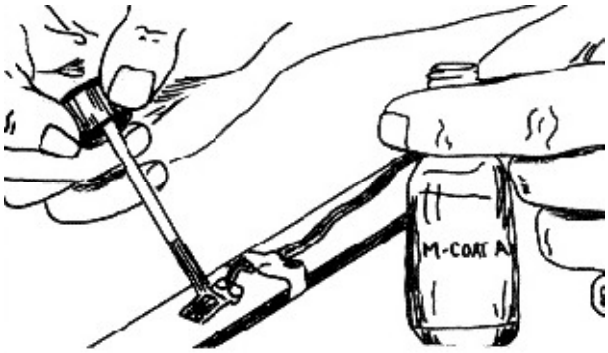


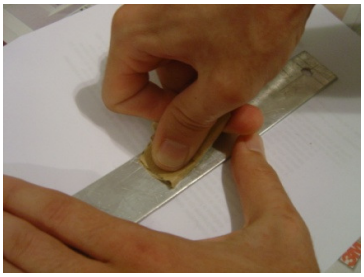
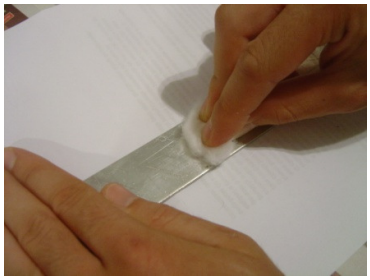
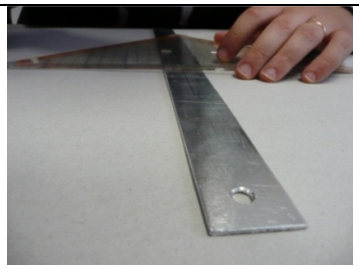
Figura A. 18 - Aplicação do Verniz

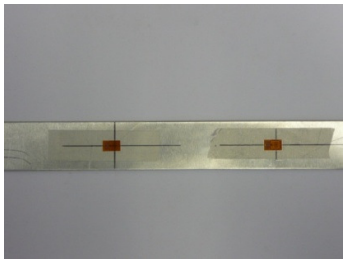
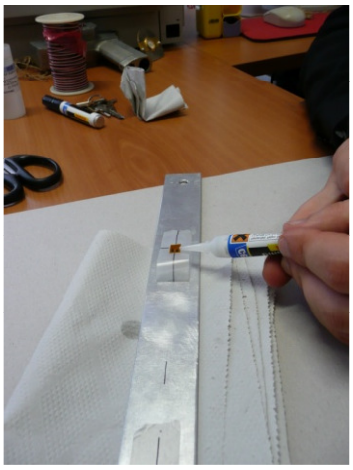
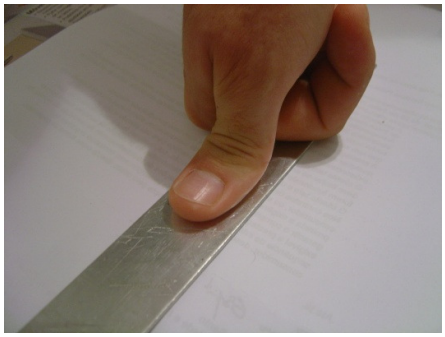
Para terminar a operação de soldadura dos cabos, deve ser realizada uma inspecção visual rigorosa para certificação da correcta instalação dos mesmos. Fazer ainda uma limpeza da área envolvida no processo de soldagem para remover óxidos ou qualquer outro tipo de impureza gerado para evitar a contaminação do sistema de medição.

Com auxílio de um multímetro deve verificar-se se as resistências entre os dois terminais estão correctas.

Anexo 6. – Esquema de Ligações (1/4 Ponte) HBM-UPM60

Anexo 7. – Colagem de Extensómetros em Barra de Al.

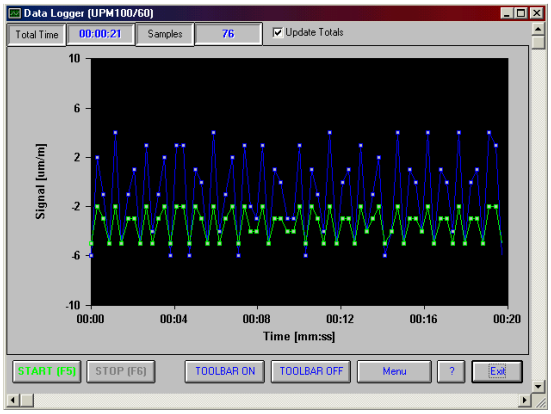
	Produtos, marca M-Line, usados para o tratamento da superfície e verniz de protecção. Da esquerda para a direita: • Verniz de Protecção; • Catalisador; • Condicionador; • Neutralizador.
	Lixagem da Superfície.
	Limpeza com Neutralizador.
	Marcação dos pontos de referência.

	Posicionamento dos Extensómetros com o auxílio de fita adesiva.
	Aplicação de cola no Extensómetro.
	Aplicação de Pressão no Extensómetro.

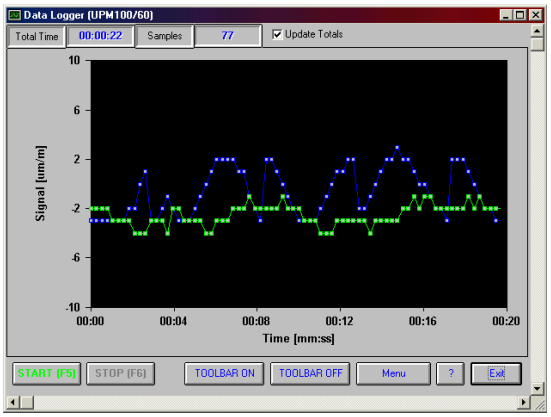
Anexo 8. – Registos de Ensaio Experimental Dinâmico

8.1 - Velocidade de oscilação: 10mm/s

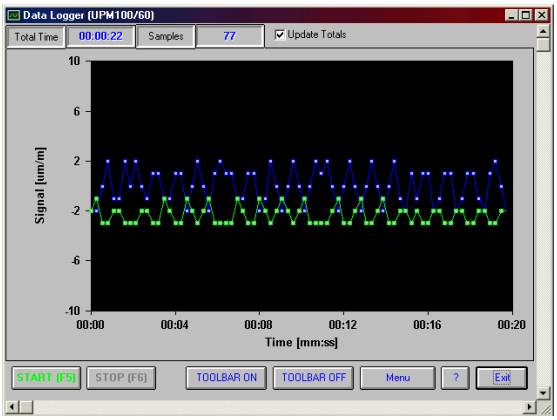
- Frequência 10Hz



- Velocidade 15Hz

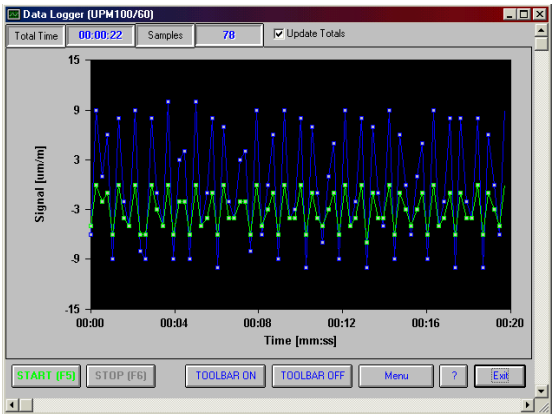


- Velocidade 20Hz

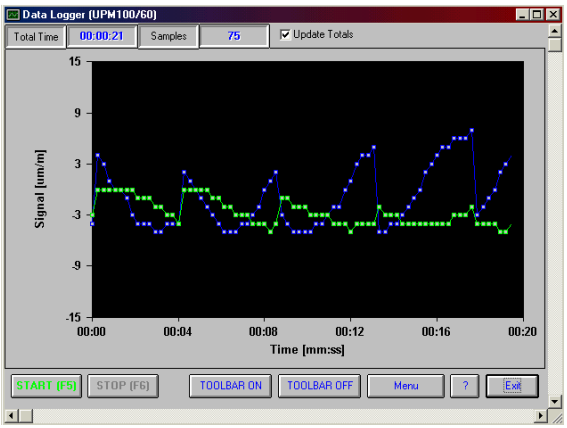


8.2 - Velocidade de oscilação: 20mm/s

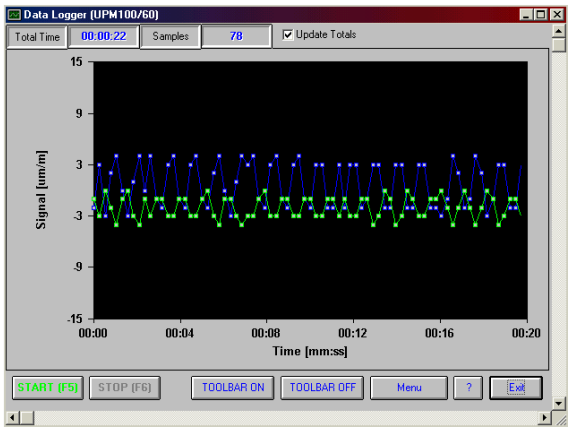
- Frequência 10Hz



- Velocidade 15Hz

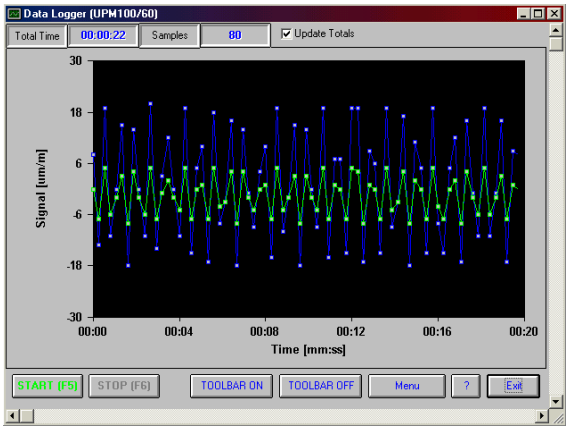


- Velocidade 20Hz

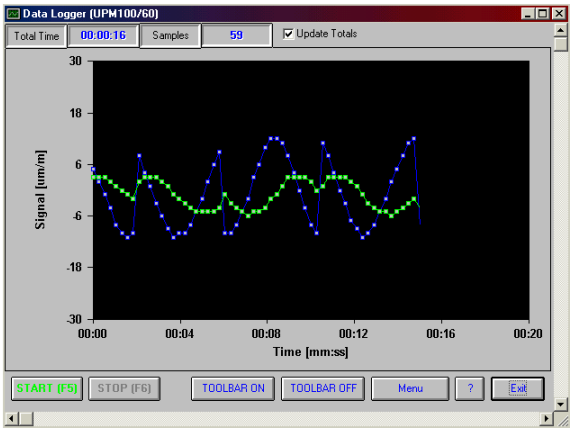


8.3 - Velocidade de oscilação: 40mm/s

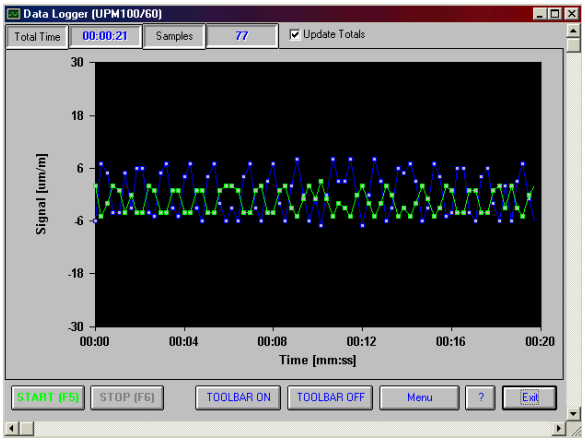
- Frequência 10Hz



- Velocidade 15Hz

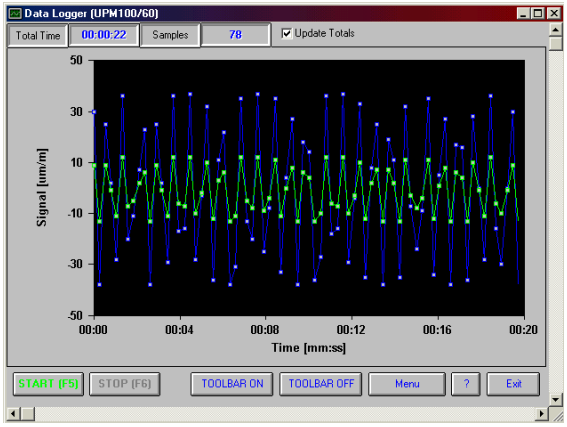


- Velocidade 20Hz

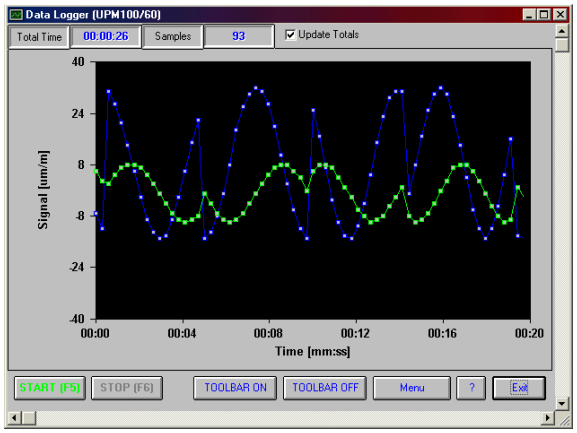


8.4 - Velocidade de oscilação: 80mm/s

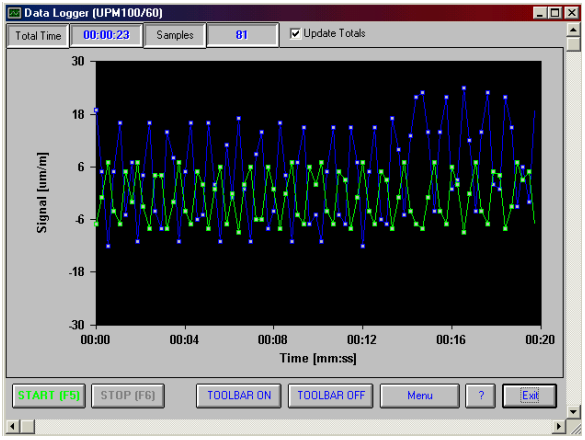
- Frequência 10Hz



- Velocidade 15Hz

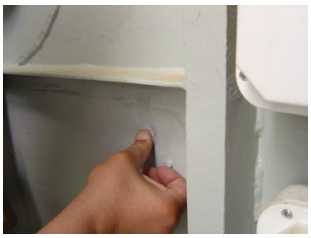


- Velocidade 20Hz



Anexo 9. – Colagem de Extensómetro na Antepara 17

	Produtos, marca M-Line, usados para o tratamento da superfície e verniz de protecção. Da esquerda para a direita: • Verniz de Protecção; • Catalisador; • Condicionador; • Neutralizador.
	Lixagem da Superfície.
	Limpeza com Neutralizador.

	Aplicação de cola.
	Aplicação de pressão.
	Soldadura dos terminais.